

Frank Beruscha

**Nutzerorientierte Gestaltung haptischer Signale in
der Lenkung**

Zum Einsatz direktonaler Lenkradvibrationen in
Fahrerassistenzsystemen

Kraftfahrzeugtechnische Berichte

Herausgegeben von Prof. Dr. Klaus Augsburg
Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik an der
TU Ilmenau

Band 5

Nutzerorientierte Gestaltung haptischer Signale in der Lenkung

Zum Einsatz
direktionaler Lenkradvibrationen
in Fahrerassistenzsystemen

Frank Beruscha



Universitätsverlag Ilmenau
2012

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 8. Juli 2011

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Augsburg
(Technische Universität Ilmenau)

2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Peter Kurtz
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Dr. rer. nat. Dietrich Manstetten
(Robert Bosch GmbH, Stuttgart)

Tag der Verteidigung: 16. März 2012

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISSN 1865-0880 (Druckausgabe)

ISBN 978-3-86360-042-6 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012000234

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

„Ich hatte vom Feeling her ein gutes Gefühl“

Andreas Möller

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit behandelt Anwendungen von Lenkradvibrationen im Kraftfahrzeug, wobei zur Abgrenzung vom Stand der Technik explizit taktile, über Sensoren der Haut wahrnehmbare Anregungen fokussiert werden. Derartigen haptischen Signalen in der Lenkung wird aufgrund der Kompatibilität von Reiz- und Handlungsort ein Potential zur Beeinflussung von Fahrerreaktionen bezüglich der Fahrzeugquerführung beigemessen. Es werden dazu Erkenntnisse zur psychophysischen Wahrnehmung taktiler Lenkradvibrationen zusammengefasst, und durch neue Resultate zum Einfluss spezifischer Vibrationsparameter auf die empfundene Intensität und Interpretation von Lenkradvibrationsbotschaften ergänzt.

Als besondere Eigenschaft vibrotaktile Anregungen wird die Möglichkeit zur Erzeugung örtlich aufgelöster Vibrationen erkannt, die Kommunikation von Richtungsinformation an den Fahrer ermöglicht. Aus dem Stand der Technik wird die subjektive Präferenz vibrationsbasierter Spurverlassenswarnungen mit signalinhärenter Richtungsinformation hypothetisiert, und die einseitige Lenkradvibration in den Fokus der Arbeit gestellt. Es wird angenommen, dass die einseitige vibrotaktile Reizung am Lenkrad die semantische Bedeutung des Spurabkommens übermittelt, so dass Interpretations- und damit Reaktionsvorteile in der Anwendung als Spurverlassenswarnsignal zu erwarten sind.

In drei Hauptstudien werden mit insgesamt 150 Probanden verschiedene Aspekte der Fahrerreaktion auf einseitige Lenkradvibrationen untersucht. Zunächst wird in einem grundlegenden Laborexperiment die intuitive Reaktion auf einseitige Lenkradvibrationen ermittelt, wodurch die notwendige Reiz-Reaktions-Zuordnung beim Einsatz des Signals als Warnausgabe eines Spurverlassenswarnsystems legitimiert werden kann.

Im Anschluss wird die hypothetisierte subjektive Präferenz der einseitigen Lenkradvibration in der Anwendung als Spurverlassenswarnsignal im direkten Vergleich mit weiteren für die Anwendung optimierten haptischen Signalen in der Lenkung nachgewiesen. Zuletzt wird der Versuch unternommen, die einseitige Lenkradvibration zur Initiierung einer Ausweichreaktion in einer drohenden Frontalkollisionssituation einzusetzen.

Auf Basis der Ergebnisse der empirischen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit wird eine deutliche Empfehlung für den Einsatz einseitiger Lenkradvibrationen als Warnausgabe von Spurverlassenswarnsystemen ausgesprochen. Dieses Signal übermittelt sowohl den Grund der Warnung als auch eine gerichtete Handlungsempfehlung auf eine unaufdringliche Weise. Darüber hinausgehende Anwendungen einseitiger Lenkradvibrationen, von denen ursprünglich insbesondere der Ausweichhinweis in einer Kollisionssituation favorisiert wurde, können durch die vorliegende Arbeit hingegen nicht bestätigt werden.

Abstract

In this work applications of steering wheel vibrations are discussed. Tactile excitations that are perceived with mechanosensors in the skin of the human palm are explicitly focussed to differentiate from the state of the art. Because of the compatibility of the location of stimulus and response, haptic signals at the steering wheel are advantageously utilized to influence lateral vehicle guidance. The thesis summarizes findings of the psychophysical perception of tactile steering wheel vibrations and supplements these findings with new insights on the effect of variations in specific stimulus parameters on the perceived intensity and interpretation of messages transferred by vibrations at the steering wheel.

A peculiar feature of vibro-tactile stimulation is the possibility to produce spatially distributed vibrations, which allows for communication of information on direction to the driver. Based on a review of the literature, a subjective preference of lane departure warning signals relying on vibro-tactile excitation and comprising information on directionality is hypothesized. This thesis therefore focusses on single-sided steering wheel vibrations. A single-sided vibro-tactile stimulation is assumed to be semantically associated with the rumble phenomenon induced in case of lane departure, thus facilitating the interpretation of the warning signal and leading to an enhancement of driver reactions when utilized as a lane departure warning signal.

Three main studies examining a total of 150 subjects were conducted to reveal specific aspects of driver reactions towards single-sided steering wheel vibrations. First of all, a fundamental laboratory study examined intuitive reactions on single-sided steering wheel vibrations, legitimizing the stimulus-response mapping necessary to utilize this kind of signal as a lane departure warning signal. The second study confirmed the

subjective predominance of the single-sided vibration as a lane departure warning signal when comparing this signal to alternative haptic warning signals at the steering wheel that were previously optimized for this application. In a final step, the third study examined the possible application of the single-sided steering wheel vibration to initiate an evasive steering reaction in case of an imminent forward collision situation

Based on the results of the experimental studies conducted in this work, the utilization of the single-sided steering wheel vibration as a lane departure warning signal is strongly recommended. The signal both transfers the reason for the warning and recommends an action in a discrete and unintrusive manner. Any further application of the single-sided vibration, particularly the advice on a steering reaction in a collision situation, which was originally favored, can not be supported based on the present work.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in der Konzernforschung der Robert Bosch GmbH am Standort Schwieberdingen in Kooperation mit der Technischen Universität Ilmenau.

Von Seiten der Technischen Universität Ilmenau gilt mein besonderer Dank Herrn Prof. Klaus Augsburg vom Fachgebiet Kraftfahrzeugtechnik für die wissenschaftliche Betreuung sowie die konstruktiven Diskussionen. Herrn Prof. Peter Kurtz vom Fachgebiet Arbeitswissenschaft danke ich herzlich für die Bereitschaft zur Übernahme der Zweitbegutachtung.

Mein außerordentlicher Dank gilt weiterhin Herrn Dr. Dietrich Manstetten von der Robert Bosch GmbH, der mir diese Arbeit ermöglicht hat. Die inhaltliche Betreuung und Führung bei gleichzeitiger Gewährung der notwendigen wissenschaftlichen Freiheiten empfand ich sowohl von Seiten der Universität als auch seitens des Unternehmens als überaus angenehm.

Des weiteren gilt mein Dank allen Kollegen der Arbeitsgruppe Mensch-Maschine Interaktion für die tolle Zusammenarbeit, die fachliche Unterstützung und die hervorragende Arbeitsatmosphäre. Mein besonderer Dank gilt hierbei Dr. Tobias Altmüller, Dr. Stephanie Arndt, Dr. Michael Dambier, Anna Engelbrecht, Claus Marberger, Christoph Noack und Marco Quander für die Unterstützung bei der Planung der Probandenstudien. Für die Unterstützung beim Bau des Lenkrads danke ich Andreas Zehender. Außerdem danke ich allen Studierenden für ihr Engagement, mit dem sie wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, namentlich Nicoletta Gasperi, Peter Hermannstädter, Timo Hummel, Fabienne Kernhof, Corinna Lankswiert, Daniel Reichelt,

Stefan Riedel, Mareike Schmidt, Nadine Simon, Anne Streib, Lei Wang, Sandra Warchol und Julia Wichmann.

Zu guter Letzt bedanke ich mich im Besonderen bei meiner Frau, meinen Eltern, meiner Familie und meinen Freunden für die dauerhafte Unterstützung, nicht nur im Rahmen dieser Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	x
1. Einleitung	1
2. Einführung in die Fragestellung	3
2.1. Fahrerassistenzsysteme	3
2.2. Terminologie zur Haptik	4
2.3. Potential und Grenzen haptischer Signale	7
2.4. Zur a-priori Fokussierung auf die Lenkung	10
3. Grundlagen	17
3.1. Synthetische haptische Signale in der Lenkung	17
3.1.1. Erzeugung und Klassifikation	17
3.1.2. Haptische Spurverlassenswarnung in der Lenkung	23
3.1.3. Haptische Ausweichhinweise in der Lenkung . . .	30
3.1.4. Weitere Einsatzgebiete	32
3.1.5. Zusammenfassung: haptische Lenkradsignale . .	37
3.2. Physiologische Grundlagen	38
3.2.1. Physiologie der Taktilität	38
3.2.2. Physiologie der Propriozeption	41
3.2.3. Muskeldehnungsreflex und Co-Kontraktion . . .	43
3.2.4. Motorik des Lenkens	44
3.2.5. Zusammenfassung: physiologische Grundlagen . .	45
3.3. Lenkradvibrationen mit Richtungsinformation	46
3.3.1. Einseitige Lenkradvibrationen	46

3.3.2.	Umlaufende Lenkradvibrationen	49
3.3.3.	Lenkradhaltung im Realverkehr	53
3.3.4.	Zusammenfassung: gerichtete Lenkradvibrationen	57
3.4.	Psychophysische Grundlagen	58
3.4.1.	Wahrnehmungskurven von Lenkradvibrationen .	58
3.4.2.	Interpretation von Lenkradvibrationen	62
4.	Konkretisierung des Handlungsbedarfs	71
5.	Allgemeine Methodik	75
5.1.	Technische Realisierung	75
5.1.1.	Auswahl der Untersuchungsumgebung	75
5.1.2.	Aufbau und Messkonzept des Fahrsimulators . .	76
5.1.3.	Aufbau des Vibrationslenkrads	78
5.2.	Probandenakquise	79
6.	Reiz-Reaktions-Kompatibilität bei vibrotaktilem Anreiz	81
6.1.	Einführung und Methodik	81
6.1.1.	Motivation, Fragestellungen und Hypothesen . .	81
6.1.2.	Versuchsdesign und -ablauf	82
6.1.3.	Versuchsplan	89
6.2.	Ergebnisse	90
6.2.1.	Stichprobenhomogenität	90
6.2.2.	Direktionalität und Neutralität der Stimuli . . .	91
6.2.3.	Ergebnisse der freien Reaktion	92
6.2.4.	Ergebnisse der instruierten Reaktion	92
6.2.5.	Doppelaufgabeninterferenz	96
6.2.6.	Subjektivurteile der Probanden	96
6.3.	Diskussion der Ergebnisse	97
6.3.1.	Allgemeine Diskussion	97
6.3.2.	Diskussion der Methoden	100
6.4.	Empfehlungen für einseitige Lenkradvibrationen	101
7.	Haptische Spurverlassenswarnung	105
7.1.	Einführung und Methodik	105
7.1.1.	Motivation, Fragestellungen und Hypothesen . .	105

7.1.2.	Vorstudie zur Optimierung der Signale	107
7.1.3.	Versuchsdesign und -ablauf	110
7.1.4.	Versuchsplan	116
7.2.	Ergebnisse	117
7.2.1.	Stichprobe	117
7.2.2.	Signalbezeichnungen	117
7.2.3.	Spontane Assoziationen	118
7.2.4.	Bewertung der vorgegebenen Assoziationen . . .	119
7.2.5.	Einsatzgebiete haptischer Signale in der Lenkung	123
7.2.6.	Bewertung der Signale für die Funktion LDW . .	123
7.3.	Diskussion und Interpretation der Ergebnisse	128
7.4.	Empfehlungen für die Spurverlassenswarnung	133
8.	Haptische Ausweichempfehlung	137
8.1.	Einführung und Methodik	137
8.1.1.	Motivation	137
8.1.2.	Versuchsdesign und -ablauf	138
8.1.3.	Versuchsplan	149
8.1.4.	Fragestellungen und Hypothesen	153
8.2.	Ergebnisse	154
8.2.1.	Datenbasis	154
8.2.2.	Reaktionen der Vpn in der Kollisionssituation . .	154
8.2.3.	Reaktionen der Vpn auf die Falschwarnung . . .	161
8.2.4.	Objektive Wirkung und subjektives Erleben der Spurverlassenswarnung	165
8.3.	Diskussion der Methoden und Ergebnisse	168
8.4.	Empfehlungen für haptische Ausweichhinweise	176
9.	Zusammenfassung und Ausblick	179
9.1.	Kernergebnisse der Arbeit	179
9.2.	Zur Praxistauglichkeit der einseitigen Lenkradvibration	182
9.3.	Ausblick	184
Anhang		187

Abbildungsverzeichnis

2.1. Übersicht der von FAS genutzten Modalitäten	5
2.2. Terminologie der Haptik	6
2.3. Potentielle Applikationsorte haptischer Signale im Fahrzeug	12
2.4. Funktionen des Lenkrads	15
3.1. Propriozeptive und taktile Signale	18
3.2. Schematische Darstellung von Lenkmomentfunktionen .	22
3.3. Statistik zur Unfallart „Abkommen von der Fahrbahn“ .	25
3.4. Statistik zur Unfallart „Zusammenstoß mit Vorderfahrzeug“	31
3.5. Haptische Signal in Spurwechselassistentensystemen	33
3.6. Haptische Signale in Spurführungsassistentensystemen . .	34
3.7. Mechanosensoren der unbehaarten Haut	39
3.8. Propriozeption und Muskeldehnungsreflex	42
3.9. Motorik des Lenkens	45
3.10. SRC-Effekt: simples Beispiel für räumliche Kompatibilität	48
3.11. Umlaufende Lenkradvibration: sensorische Saltation . .	50
3.12. Umlaufende Lenkradvibrationen: Richtungsinformation .	52
3.13. Studien zur Lenkradhaltung	54
3.14. Lenkradvibrationen: Reizschwellen in der Hand	60
3.15. Lenkradvibrationen: ESC und Toleranzschwellen	61
3.16. Interpretation von Vibrationen: Versuchsaufbau	63
3.17. Interpretation von Vibrationen: Versuchsablauf	65
3.18. Interpretation von Vibrationen: Botschaftenzuordnung .	67
3.19. Interpretation von Vibrationen: Einfluss der Intensität .	68
4.1. Übersicht der durchgeführten Studien	72
5.1. Auswahl der Untersuchungsumgebung	75
5.2. Schematische Darstellung des Fahrsimulatorlabors	77
5.3. Aufbau des Vibrationslenkrads	78
6.1. Versuchsablauf der SRC-Studie	83

6.2. Versuchsphase „Freie Reaktion“	84
6.3. Versuchsphase „Instruierte Reaktion“	86
6.4. Schema eines Trials der Doppelaufgabe	87
6.5. Versuchsplan der SRC-Studie	90
6.6. Ergebnisse: Haupteffekt des Mappings	93
6.7. Ergebnisse: Haupteffekt der Semantik	94
6.8. Ergebnisse: Interaktionseffekt	95
6.9. Assoziationskette zur Wirkung der Semantik	99
7.1. Vorstudie: Übersicht der einzustellenden Parameter . . .	109
7.2. Vorstudie: Boxplots der optimierten Parameter	110
7.3. Versuchsablauf der LDW-Studie	111
7.4. Versuchsphase „Interpretation“	113
7.5. Versuchsphase „Anwendung“	115
7.6. Ergebnisse: Assoziationsstärke	120
7.7. Ergebnisse: Eigenschaften der haptischen LDW-Signale .	125
7.8. Ergebnisse: Eignung als haptische LDW-Signale	126
7.9. Präferenz der Vpn	127
7.10. Relevante Merkmale der haptischen Signale	130
8.1. Zeitverlauf der Annäherung im Folgeszenario	144
8.2. Unterscheidung zwischen Folge- und Kollisionsszenario .	145
8.3. Spurbreite und Streckenverlauf der Szenarien	147
8.4. Versuchsteil „Spaß & Komfort“	148
8.5. Gesamtzusammensetzung des Versuchs	150
8.6. Gruppeneinteilung und Gruppenvergleiche	151
8.7. Ergebnisse: Datenbasis	154
8.8. Ergebnisse Kollisionswarnung: Wirkung der Habituation	156
8.9. Ergebnisse Kollisionswarnung: Reaktionen der Vpn . . .	157
8.10. Ergebnisse Kollisionswarnung: Details der Bremsreaktion	158
8.11. Ergebnisse Kollisionswarnung: Wahrnehmung d. Warnung	160
8.12. Ergebnisse Falschwarnung: Reaktionen der Vpn	163
8.13. Ergebnisse Spurverlassenswarnung: LDE	165
8.14. Ergebnisse Spurverlassenswarnung: gezielte Warneauslösung	166
8.15. Ergebnisse Spurverlassenswarnung: Signaleigenschaften .	169
8.16. Ergebnisse Spurverlassenswarnung: Signalmerkmale . . .	170

Tabellenverzeichnis

3.1. Ausgewählte Eigenschaften der Mechanosensoren	40
3.2. Rechenbeispiel „Eignung“ und „diskrim. Eignung“	66
6.1. Ergebnisse der SRC-Studie: Richtung der freien Reaktion	92
7.1. Übersicht der untersuchten haptischen Signale	106
7.2. Übersicht der Fahrsituationen in der Phase „Interpretation“	112
7.3. Ergebnisse der LDW-Studie: Maßzahlen p_i und q_i	122
8.1. Abstände und Geschwindigkeiten der Folgesituation . .	146
8.2. Füllszenarien: Kurvenkrümmung in der Verengung . . .	146

Abkürzungsverzeichnis

(V)RBS	(Variable)Rumble Strip, Ansatz für die Bewertung der Spurverlassensgefahr
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control, Abstandsregeltempomat
AFIL	Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne bzw. Alarm bei Fahrspurabweichung durch Infrarot Linienerkennung
ANOVA	Analysis of Variance, Varianzanalyse
AV	Abhängige Variable
BSD	Blind Spot Detection, Erkennung von Objekten im Toten Winkel
CAN	Controller Area Network, Feldbus im Automobilbereich
DoS	Duration of Stimulus, Stimulusdauer
EAC	Equal Annoyance Contour/Curve, Kurve gleich empfundener Störung
EF	Egofahrzeug
EPS	Electrical Power Steering
ESC	Equal Sensation Contour/Curve, Kurve gleicher Empfindung
FAS	Fahrerassistenzsystem
FCW(S)	Forward Collision Warning (System), (Frontal)Kollisionwarnung bzw. -warnsystem
IAPS	International Affective Picture System
ISI	Inter Stimulus Interval, Dauer zwischen zwei Stimuli

JND	.....	Just Noticeable Difference, differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle
KV	.....	Kontrollvariable
LCA(S)	.....	Lane Change Assistance System, Spurwechselassistenz(system)
LDE	.....	Lane Departure Event, Spurverlassensereignis
LDW(S)	.....	Lane Departure Warning (System), Spurverlassenswarnung bzw. -warnsystem
LKA(S)	.....	Lane Keeping Assistance (System), Spurführungsassistenz(system)
LKS	.....	Lane Keeping Support, Spurführungsunterstützung
MS	.....	‘Mit Semantik’, Versuchsbedingung der SRC-Studie
OS	.....	‘Ohne Semantik’, Versuchsbedingung der SRC-Studie
RSVP	.....	Rapid Serial Visual Presentation
RT	.....	Reaction Time, Reaktionszeit
SAM	.....	Self Assessment Manikin
SbW	.....	Steer-by-Wire
SRC	.....	Stimulus-Response Compatibility, (örtliche) Reiz-Reaktions-Kompatibilität
SUV	.....	Sports Utility Vehicle
TH	.....	Time Headway
TLC	.....	Time to Lane/Line Crossing, Ansatz für die Bewertung der Spurverlassensgefahr
TTC	.....	Time To Collision
UV	.....	Unabhängige Variable
VF	.....	Vorderfahrzeug
Vp(n)	.....	Versuchsperson(en)

1. Einleitung

Die Entwicklungen der letzten Jahre machen aus Kraftfahrzeugen intelligente Fortbewegungsmittel, die Fahrsituationen sensieren, Informationen erfassen und bewerten, und dem Fahrer auf unterschiedlichen Ebenen der Fahrzeugführung assistieren können. An der Schnittstelle zum Menschen bedienen sie sich vorwiegend optischer oder akustischer Signale. Es blinkt, leuchtet und hupt im Fahrzeug, und unlängst werden Bedenken laut, die eine Überlastung der visuellen Aufnahmefähigkeit oder eine Störung der Privatsphäre des Fahrers fürchten. Entsprechend groß ist das Potential, das haptischen Signalen beigemessen wird, Entscheidungen von Fahrerassistenzsystemen fühlbar zu artikulieren. Sie sind privat, können schnelle Reaktionen hervorrufen, und direkt am Handlungsort appliziert werden. Erste Systeme mit haptischer Rückmeldung werden bereits heute serienmäßig im Fahrzeug eingesetzt, und unzählige Forschungsaktivitäten prognostizieren haptischen Signalen eine vielversprechende Zukunft.

Wie aber reagieren Fahrer auf haptische Anregungen? Allzu oft scheinen konkrete Auslegungen haptischer Signale insbesondere an technische Gegebenheiten geknüpft zu sein und erwartete Fahrerreaktionen lediglich auf Annahmen menschlicher Informationsverarbeitung zu beruhen. So werden spürbare mechanische Impulse am Bremspedal mit der Intention eingesetzt, eine Bremsreaktion zu initiieren, was von Fahrern teilweise nicht verstanden wird ([Bro05]) oder im Extremfall zu einem Betätigen des Gaspedals führt ([Shu99]). So sollen Lenkmomente in Richtung der gewünschten Lenkreaktion den Fahrer unterstützen (z. B. [MP04]), bewirken mitunter aber eine dem Moment entgegengerichtete Reaktion (z. B. [ZFRK95]) oder sollen gar ein reflexartiges Gegenlenken auslösen ([KEE09]). So soll eine Vibration am Lenkrad bspw. als Spurverlassenswarnsignal (z. B. [ABD96]), als Hinweis auf eine zu

hohe Kurveneingangsgeschwindigkeit ([Bie98]) oder als Rückmeldung eines Müdigkeitswarnsystems ([DKB09]) interpretiert werden. So soll eine einseitige Vibration an Lenkrad oder Fahrersitz dem Fahrer die Richtung eines drohenden Spurverlassens anzeigen und damit ein Weglenken bewirken ([EJFN⁺08]), oder mit einem Lenken in Richtung der Vibration quittiert werden, wenn diese von einem Navigationssystem ausgegeben wird ([KMH⁺09], [EV01]).

Die genannten Beispiele zeigen, dass auf dem Gebiet der haptischen Informationsübertragung längst nicht alle Fragen beantwortet sind. Mit der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, ein besseres Verständnis der Interpretation von und Reaktion auf haptische Signale in der Lenkung, im Speziellen auf einseitig applizierte Lenkradvibrationen zu gewinnen. Die Arbeit widmet sich dazu u. a. den nachfolgenden Fragen: In welchen Anwendungen ist der Einsatz haptischer Signale in der Lenkung zweckmäßig? Welche Anforderungen und Wünsche stellen Fahrer an die Signalisierung in diesen Anwendungen? Wie sieht eine Realisierung aus, die diese Anforderungen berücksichtigt? Wie reagieren naive¹ Fahrer auf das Signal und besteht ein Widerspruch zwischen der naiven und der im Anwendungsfall geforderten Reaktion? Bestehen Unterschiede zwischen den Reaktionen naiver und trainierter Fahrer? Besteht das Signal den Praxistest im Vergleich mit anderen haptischen Signalen? Und kann das im Anwendungsfall notwendige Reaktionsmuster über den Anwendungsfall hinaus auch in anderen Situationen aufrecht erhalten werden?

¹Fahrer, die keine Kenntnis über das Vorhandensein des Signals haben und mit diesem erstmalig konfrontiert werden.

2. Einführung in die Fragestellung

Die vorliegende Arbeit untersucht synthetische haptische Signale in der Lenkung, deren Wahrnehmung sowie deren Einfluss auf Fahrerhandlungen. In Anlehnung an [Bus03] sind unter synthetischen Signalen solche Signale zu verstehen, die künstlich aktiv, d. h. unter Nutzung einer zusätzlichen Energiequelle, erzeugt werden können. Konkret betrachtet die vorliegende Arbeit haptische Signale in der Lenkung als Ausgaben von Fahrerassistenzsystemen (FAS) mit dem Ziel, den Fahrer¹ bei der Fahrzeugführung zu unterstützen.

2.1. Fahrerassistenzsysteme

Als Definition von FAS wird dieser Arbeit die Definition von Engeln & Wittig ([EW05]) zugrunde gelegt (s. [Arn10] für eine kritische Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Definitionen von FAS). Diese bewertet die Zuständigkeiten bei den drei Handlungs- bzw. Funktionsebenen, in welche sich die Fahraufgabe untergliedern lässt: das Erfassen von Information, die Bewertung der Information sowie die Ausführung der Handlung. Ein FAS liegt demnach dann vor, wenn das Erfassen und/oder das Bewerten von Information primär durch die Technik erfolgt. Beispiel hierfür ist ein Spurverlassenswarnsystem (s. Abschnitt 3.1.2), welches aus der Umgebungsinformation (Erfassen) eine Spurverlassensgefahr ermittelt (Bewerten) und ggf. den Fahrer warnt.

Weiterhin kann eine Unterteilung von FAS nach dem Grad der Automatisierung vorgenommen werden (z. B. [Ben08], [Sti05]). Mit steigendem

¹Zu Gunsten der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit nur die männliche Schreibform verwendet, welche selbstverständlich beide Geschlechter einbezieht.

Unterstützungsgrad wird zwischen informierenden, warnenden, assistierenden, teilautonomen und vollautonomen Systemen unterschieden. Informierende Systeme wie bspw. Navigations- oder Nachtsichtsysteme konzentrieren sich primär auf die Erfassung und Darstellung von Information. Warnende Systeme, zu denen die o.g. Spurverlassenswarnsysteme gezählt werden, nehmen zusätzlich eine Bewertung der erfassten Information vor. Einen fortgeschrittenen Automationsgrad weisen assistierende sowie teil- und vollautomatisierte Systeme auf, indem sie handlungsunterstützend bzw. -ersetzend eingreifen (vgl. [Sch09]). Beispiel eines assistierenden Systems ist das Spurhaltesystem, welches den Fahrer durch aktive Lenkeingriffe bei der Spurführung unterstützt. Teil- und vollautomatisierte Systeme übernehmen Funktionen der Fahrzeugführung teilweise (z.B. Übernahme der Fahrzeuglängsführung durch Abstandsregeltempomaten) oder komplett, wodurch eine Hauptaufgabe des Fahrers in der Systemüberwachung liegt.

Abb. 2.1 gibt einen Überblick über den groben Fokus dieser Arbeit. Der Begriff der haptischen Signale wird im folgenden Abschnitt 2.2 thematisiert, bevor diese Modalität in Abschnitt 2.3 mit weiteren Modalitäten verglichen wird, wobei synthetische olfaktorische sowie gustatorische, also den Geruchs- bzw. Geschmackssinn stimulierende Signale, aufgrund der (noch) fehlenden Anwendungsgebiete im Fahrzeugkontext nicht in den Vergleich miteinbezogen werden. In Abschnitt 2.4 wird der Fokus der Arbeit konkretisiert.

2.2. Terminologie zur Haptik

Unter dem Begriff der haptischen Wahrnehmung (Haptik, aus dem griechischen *haptein*: „berühren, begreifen, erfassen, tasten“) werden Sensitivitäten zusammengefasst, die in Zusammenhang mit dem „Fühlen“ stehen. Hierbei werden unterschiedliche Wahrnehmungsphänomene summiert, was zu einem geringen allgemeinen Konsens bei der Begriffsverwendung in der Literatur führt. Die in der vorliegenden Arbeit verwendete Terminologie orientiert sich weitgehend an der bspw. in [Bus03],

FAS	Fahrzeug-Fahrer-Interaktion				
	visuell	akustisch	haptisch	olfaktorisch	gustatorisch
informierend	vergleichsweise gut untersucht		Fokus der Arbeit	Einsatzmöglichkeiten noch ungeklärt	
warnend					
[...]					

Abb. 2.1.: Modalitäten der Fahrzeug-Fahrer-Interaktion:
Übersicht der von FAS genutzten Modalitäten (nach [Rie09]) zur Kommunikation mit dem Fahrer und Eingliederung der vorliegenden Arbeit (in Anlehnung an [Rie09], S. 28).

[Bie98], [Rei09], [Sch93] und [Sch09] verwendeten Einteilung und ergänzt sie an wenigen Stellen, wie nachfolgend beschrieben. Demnach umfasst die haptische Wahrnehmung sowohl propriozeptive als auch taktile Empfindungen.

Die **taktile Wahrnehmung** (Taktilität) umfasst die Wahrnehmung von Druck, Berührung und Vibration² mit Mechanosensoren (früher auch Mechanorezeptoren, s. [Han05b]) in und unter der Haut. Sie wird auch als Mechanorezeption, Mechanozeption oder Mechanosensorik bezeichnet. Druck-, Berührungs- und Vibrationssinn bilden die mechanischen Hautsinne. Im Rahmen dieser Arbeit ist besonders die **vibrotaktile Wahrnehmung** mechanischer Vibrationsreize (z. B. [Erp01], [HTS05], [MB07], [Ver85]) zu erwähnen. Die mechanischen Hautsinne bilden mit Temperatur- und Schmerzsinn (Thermorezeption bzw. Nozi-zeption) die Haut- bzw. Tastsinne. Eine weiterführende Differenzierung der für die Temperaturwahrnehmung verantwortlichen freien Nervenendigungen der Haut (Thermorezeptoren) erfolgt in Warm- und Kaltsensoren, deren größte Sensitivität im Bereich 30-45°C bzw. 15-35°C liegt ([LL07]). Die Schmerzwahrnehmung erfolgt ebenfalls über freie Nerven-

²In [Hen85] wird zudem ein Kitzelempfinden unterschieden; in [BRW07] wird der taktilen Wahrnehmung zusätzlich die Dehnungsempfindung zugeordnet.

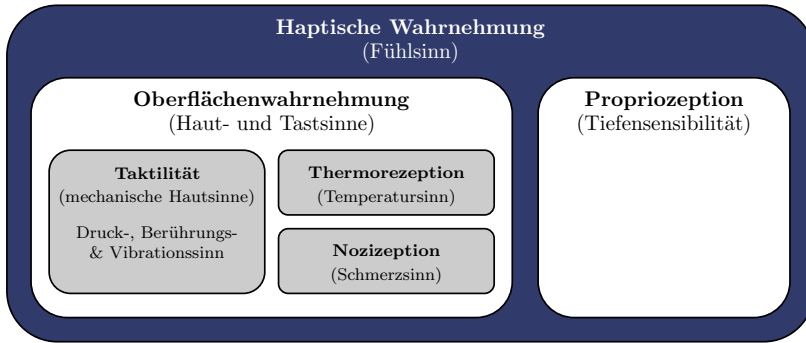


Abb. 2.2.: Terminologie zur Haptik:

Übersicht der in dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten.

endigungen in der Haut (Schmerzrezeptoren), welche auf starke mechanische und thermische Reize reagieren ([LL07]). Die Wahrnehmung der Haut- und Tastsinne wird auch als Oberflächen sensibilität bezeichnet.

Die **propriozeptive Wahrnehmung** (Propriozeption, auch Lagesinn ([Zim05]) oder Sensorik des Bewegungsapparates ([Han05b])) beschreibt das Gelenkstellungs-, Bewegungs- und Gegenkraftempfinden. Sie wird in Analogie zur Oberflächen sensibilität auch als Tiefensensibilität bezeichnet, da sich die für die Empfindung verantwortlichen Rezeptoren in den Muskeln, Sehnen, Bändern und Gelenkkapseln befinden ([Han05b]).

Die **haptische Wahrnehmung** summiert Oberflächen- und Tiefensensibilität. Bei Beschränkung auf (nicht schmerzauslösende) mechanische Reize umfasst die haptische Wahrnehmung taktile und propriozeptive Empfindungen. Die Einteilung in Taktilität und Propriozeption ist insbesondere physiologisch motiviert (vgl. Abschnitte 3.2.1 und 3.2.2). Abbildung 2.2 fasst die Terminologie zusammen.

Weiterhin wird unter **vestibulärer Wahrnehmung** das Beschleunigungs- und Gegenkraftempfinden über Organe des Innenohrs verstanden. Dieses verfügt hierzu über drei Bogengänge und zwei Maculaorgane (Sacculus und Utriculus) zur Wahrnehmung von Rotations- bzw.

Translationsbeschleunigungen ([LL07]). Wie Bubb anmerkt können Beschleunigungen auch taktil über Druckveränderungen sensiert werden, was sich u. a. in der Begrifflichkeit des „Popometers“ äußert ([Bub01]).

Die Begriffe **kinästhetische Wahrnehmung** sowie **Somatosensorik** finden in der Literatur unterschiedliche Verwendungen. So wird Somatosensorik bspw. gleichbedeutend mit der haptischen Wahrnehmung ([Hen85], [Han05b]), der Oberflächenwahrnehmung ([She93]) oder der Zusammenfassung von haptischer und vestibulärer Wahrnehmung ([Cam93]) verstanden. Einen ähnlich geringen Konsens bemerkt [Bus03] für die kinästhetische Wahrnehmung, weshalb die Verwendung dieser Begriffe in der vorliegenden Arbeit vermieden wird.

2.3. Potential und Grenzen haptischer Signale

Als synthetische haptische Signale werden mechanische Anregungen bezeichnet, die vom Empfänger³ propriozeptiv oder taktil wahrgenommen, also gefühlt werden. Aus verhaltenspsychologischer Sicht wird zwischen einer aktiven und einer passiven Berührung unterschieden, wobei sich die Aktivität (bzw. Passivität) auf den Empfänger bezieht (z. B. [Rei09]). Unter dem Begriff der „Haptik im Kraftfahrzeug“ wird in der Literatur bspw. auch das haptische Wahrnehmen der Stellung eines Schalters oder Drehstellers verstanden (z. B. [Bie98], [Bub01], [RBS09]). Diese informationelle Rückmeldung ist theoretisch blind, d. h. ohne visuelle Zuwendung möglich. Da dieses Erfühlen aktive Bewegungen zur Erkundung des Objekts seitens des Empfängers voraussetzt, wird hierbei von aktiver Berührung oder Exploration gesprochen.

Die passive Berührung bedarf hingegen einer spürbaren mechanischen Anregung des Objekts, ohne dass eine aktive Bewegung des Empfängers notwendig wird. Beispiel hierfür ist die 1-Bit Nachricht über eingehende Anrufe durch Handyvibrationen ([EV01]). Die Informationsübertragung wird in diesem Fall durch das System initiiert. Die vorliegende Arbeit

³Im Falle der vorliegenden Arbeit handelt es sich beim Empfänger haptischer Signale immer um den Fahrer eines Kraftfahrzeugs.

hat lediglich solche haptische Signale zum Inhalt, deren Darbietung auf Basis einer Systemsentscheidung und nicht auf expliziten Wunsch des Fahrers initiiert wird, und die daher passiv wahrgenommen werden.

Der zunehmende Einsatz haptischer Signale im Fahrzeug ist aus der Feststellung motiviert, dass dieser Kanal für die Übertragung *synthetischer* Information weitestgehend ungenutzt ist: „Die Entwicklung von FAS, die die taktile und kinästhetische Wahrnehmung verwendet, hat aber erst begonnen [...]“ ([BD09], S. 317). Dennoch nehmen Fahrer sehr wohl bereits heute Information über den haptischen Kanal wahr. Dies zeigt sich z. B. in einer Untersuchung von Muckler & Obermayer, die nach Ansicht Gordons repräsentativ ist ([Gor66]). Hier wurden von Rennfahrern das „Hosenboden-“ und „Lenkgefühl“ an zweiter bzw. vierter Stelle der wichtigsten Informationsquellen beim Fahren genannt, der Normalfahrer führte das „Lenkgefühl“ an dritter Stelle.

Die visuelle Modalität stellt uneingeschränkt die wichtigste Modalität des Autofahrens dar, über die der Fahrer 90 bis 99% aller relevanten Information wahrnimmt (z. B. [Bar04b], [Maj97]). Der visuelle Kanal ist der einzige, ohne den die Fahrzeugführung nicht möglich ist ([Bie98]). Die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers ist nach einer Einschätzung Hughes & Coles allerdings zu 30 bis 50% der Gesamtfahrzeit nicht fahrbezogenen, irrelevanten Objekten gewidmet ([HC86]). Gleichzeitig wird der visuelle Kanal zunehmend überladen (z. B. [HTS05], [LC95], [MB07], [Sch09]) und kann sehr schnell an seine Belastungsgrenze getrieben werden ([Bie98]). Eine zusätzliche Belastung der visuellen Modalität durch synthetische Signale sollte aus diesem Grund wenn möglich nicht vorgenommen werden ([ABD96]). Eine weitere Einschränkung visuell übertragener Information ist die notwendige Blickzuwendung durch den Fahrer, wodurch visuelle Information leicht übersehen werden kann. Wie Schmidt in diesem Zusammenhang argumentiert, ist davon auszugehen, dass ein synthetisches visuelles Signal den Fahrer nicht schneller oder besser informiert als dessen eigentliche Sicht, weshalb der alleinige Einsatz visueller Signale in vielen Anwendungen (z. B. Systeme zur Spurverlassenswarnung) nicht als sinnvoll erachtet wird ([Sch09]).

Dagegen sind akustische und haptische Signale omnidirektional, d. h. ihre Wahrnehmung erfordert keine gerichtete Zuwendung wie bei visuellen Signalen ([SS99]). Gegenüber akustischen Signalen haben haptische Signale den Vorteil, dass sie privat sind, also nur vom Fahrer wahrgenommen werden. Dies verhindert zum einen ein Bloßstellen des Fahrers, wenn das Signal auf eine Unzulänglichkeit des Fahrers bzw. einen Fahrfehler schließen lässt (z. B. [Fri09], [HTS05], [Kop94], [PE03], [Ros06], [Sch09]), zum anderen werden Beifahrer durch ein haptisches Signal nicht gestört (z. B. [MB07], [SSD05]). Besonders hervorzuheben ist diese Eigenschaft in Reisebussen, in denen lediglich Warnungen in Frage kommen, die ausschließlich vom Fahrer und nicht von den Fahrgästen wahrgenommen werden ([DHS09]). Die auditive Wahrnehmung kann durch Unterhaltungen mit Beifahrern und Mobiltelefongespräche stark gebunden sein (z. B. [LH04], [Str07]). Analog zur Gefahr des „Übersehens“ visueller Information können akustische Signale z. B. aufgrund von Hintergrundlärm „überhört“ werden ([HTS05]). Sofern ein Fahrerkontakt vorhanden ist, besteht diese Gefahr bei haptischen Signalen nicht, die sich bei geeigneter Darbietung nur gering mit natürlichen haptischen Anregungen überlagern ([Fri09]). Synthetische haptische Signale sind, sofern die Reizintensität die Wahrnehmungsschwelle überschreitet, im Fahrzeug nur sehr wenigen Störquellen ausgesetzt ([Ros06]).

Bei geeigneter Darbietung können haptische Signale weniger störend oder ablenkend wirken als akustische Signale (z. B. [FKHK07], [LHH04], [SSD05]). In einer Studie von Volvo akzeptierten Fahrer bei haptischen Spurverlassenswarnungen mit gerichteten Lenkmomenten deutlich mehr Fehlauflösungen als bei akustischen Warnungen ([PE03]). Weiterhin existieren Hinweise darauf, dass insbesondere ältere Fahrer durch akustische Warnungen in belastenden Situationen eher überlastet als unterstützt werden ([KWM09]). Die Akzeptanz haptischer Signale wird bei adäquater Darbietung generell als äußerst hoch eingeschätzt ([Ros06]). Zudem gilt der haptische Kanal als der schnellste Kanal der Informationsvermittlung an den Menschen (z. B. [Bar04b], [Bie98], [HTS05], [Kop94], [SKSG07], [Sch09]). Unter gewissen Voraussetzungen können haptische Signale auch auf der Ebene des Rückenmarks verarbeitet wer-

den, so dass reflexhafte Handlungen mit deutlich verkürzten Reaktionszeiten ermöglicht werden, ohne dass eine zeitbindende Informationsverarbeitung im Großhirn notwendig ist ([Ros06]).

Die Herausforderung bei der Vermittlung synthetischer haptischer Information liegt häufig insbesondere in deren Interpretierbarkeit, was bspw. in einer Studie von Breuer sichtbar wird ([Bre96]). Während die Auffälligkeit haptischer Signale an Fahrpedal und Lenkrad bei relativ geringer Streuung sehr hoch eingestuft wurde, wurden diese Signale als wenig eindeutig bewertet. Derzeit erscheint die haptische Modalität alleine nicht für die Übermittlung komplexer Information geeignet ([Fri09]).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass haptische Signale bei geeigneter Darbietung einfach und privat wahrgenommen werden und zu schnellen Reaktionen führen können. Weiterhin wirken haptische Signale aufmerksamkeitsregend und -lenkend, sind ferner blickunabhängig und nur schwer zu maskieren. Eine treffende Zusammenfassung formulieren Oakley & Park bei der Analyse des Vibrationsalarms von Mobiltelefonen: „They can provide attention grabbing notifications to users engaged in unrelated tasks (which screen-based visual cues cannot) and do this discreetly (which speaker-based audio cues cannot) and without explicitly interrupting users“ ([OP08], S. 354).

2.4. Zur a-priori Fokussierung auf die Lenkung

In der vorliegenden Arbeit werden synthetische haptische Signale untersucht, deren Darbietung auf Basis einer Systementscheidung und nicht auf expliziten Wunsch des Fahrers initiiert wird (vgl. Abschnitt 2.3). Dies setzt die Erfüllung der von [Erp02] formulierten Anforderung voraus, wonach haptische Signale selbsterklärend sein müssen, und nur an solchen Stellen appliziert werden können, bei denen ein Fahrerkontakt zum Darbietungszeitpunkt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit gegeben ist ([BGJ80], [EV01]). Im Gegensatz dazu könnten Fahrer beim Anfordern einer gewünschten Information den Applikationsort des haptischen Signals zum gewünschten Darbietungszeitpunkt gezielt aufsuchen.

Für die praktikable Anwendung werden weiterhin nur solche haptischen Signale betrachtet, die durch fest im Fahrzeug integrierbare Aktorik übertragen werden können. Durch diese Eingrenzung werden bspw. Signale ausgeschlossen, die nur durch das Tragen zusätzlicher mit haptischer Aktorik ausgestatteter Westen (z. B. [EV03], [GOS01], [RN00]), Gürtel (z. B. [Erp00], [Erp01], [LWK08], [TY03]), Bänder oder Bandagen an Unterarm bzw. Handgelenk (z. B. [SS99], [Zlo88]), Kopf- oder Fußbedeckungen (z. B. [GS94], [KSL⁺06]) oder sonstiger Bekleidung appliziert werden können. Systeme dieser Art, die zumeist Navigations- oder Orientierungsinformationen über Vibrationsmuster übermitteln, werden häufig unter dem Begriff der „taktile Displays“ zusammengefasst (z. B. [CMH08], [Erp02], [JS08], [TP97], [Woo98]).

Potentielle Applikationsorte synthetischer haptischer Signale im Fahrzeug sind nach dieser Fokussierung das Lenkrad, Pedalerie und Fußraum, der Sitz sowie der Sicherheitsgurt ([GA00], [GA05], [GW05a], [HM03], [MK98], [Ros06], [Sch93], s. Abb. 2.3). Dabei herrscht in der Literatur ein allgemeiner Konsens darüber, dass der Handlungsort haptisch über den Reizort codiert werden sollte. Demnach scheinen insbesondere Lenkrad bzw. Pedalerie als primäre Stellelemente der Fahrzeugquer- bzw. -längsführung geeignet, um Fahrer bei der Fahrzeugführung zu unterstützen (z. B. [HR10], [KS09], [MP04], [RLD⁺10], [Sch09]). Dieses Prinzip wird häufig als Reiz-Reaktions-Kompatibilität bezeichnet, wobei hierunter in dieser Arbeit nicht Interpretationsvorteile bei der Übereinstimmung von Reiz- und Handlungsort, sondern vielmehr Reaktionsvorteile bei räumlicher Übereinstimmung von directionalen Reizen und Reaktionen verstanden werden (s. Abschnitt 3.3.1).

Dass Reaktionen auf haptische Signale nicht immer intuitiv erfolgen müssen sondern auch erlernbar sind, wird am Beispiel des Applikationsortes Fahrersitz deutlich. In Studien wurden Sitzvibrationen u. a. dazu eingesetzt, vor zu hohen Kurveneingangsgeschwindigkeiten oder Frontalkollisionen zu warnen (z. B. [SSD05], [Hof08]), Navigationsinformationen zu übermitteln (z. B. [EV01], [Rie09]) oder Hinweise auf ein ein- bzw. auszuschaltendes Abblendlicht zu geben ([Rie09]). Weiterhin über-

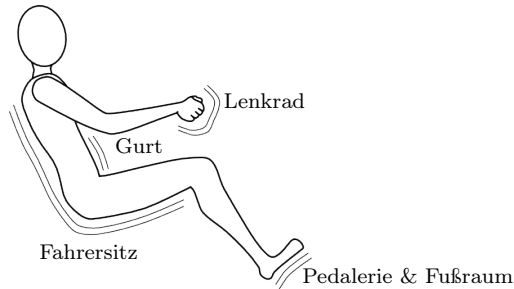


Abb. 2.3.: Potentielle Applikationsorte synthetischer haptischer Signale im Fahrzeug.

mittelt das in Serie befindliche AFIL⁴-System von Citroën haptische Warnungen bei drohendem Spurverlassen über directionale Sitzvibrationen (siehe z. B. [ACD⁺04], [GST⁺08], [MP04], [NMF⁺08], [SSD05] für weitere Studien zur Anwendung von Sitzvibrationen als Spurverlassenswarnsignal). Wie sich herausstellt variiert die Wahrnehmung von Vibrationsstimuli am Fahrersitz mit Gewicht, Größe und Sitzposition des Fahrers ([RF09]), so dass eine Rekonfiguration der vibrotaktilen Reizung in Abhängigkeit dieser Faktoren notwendig wird, für deren Messung ein zusätzlicher Hardwareaufwand entsteht ([HR10]).

Dass sowohl Fahrerreaktionen hinsichtlich der Fahrzeugquer- als auch -längsführung über Sitzvibrationen bewirkt werden können ([RLD⁺10]), kann in der Tatsache begründet sein, dass der Fahrersitz kein Stillelement des Fahrzeugs ist. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist es mit haptischen Signalen in der Lenkung als primärem Stellelement der Fahrzeugquerführung nicht möglich, Fahrerreaktionen bzgl. der Fahrzeuglängsführung zu initiieren (Analoges kann für haptische Signale in der Pedalerie zur Beeinflussung der Querführung festgestellt werden). So scheitert bspw. Bielaczek mit dem Versuch, mithilfe einer haptischen Signalisierung am Lenkrad eine Geschwindigkeitsreduktion zu bezwecken ([Bie98], s. Abschnitt 3.1.4).

⁴„Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne“ bzw. „Alarm bei Fahrspurabweichung durch Infrarot Linienerkennung“

Unter der Prämisse des zwingend notwendigen Fahrerkontakts können haptische Signale an der Pedalerie nur als Reaktion auf eine Aktion des Fahrers am entsprechenden Pedal ausgegeben werden⁵. So können Fahrer bspw. nur dann auf die Notwendigkeit einer (stärkeren oder schwächeren) Bremsstätigkeit hingewiesen werden, wenn sie mit dem Fuß bereits in Kontakt mit dem Bremspedal sind. In den letzten Jahren kann eine erhöhte Marktdurchdringung von Abstandsregeltempomaten (ACC: *Adaptive Cruise Control*) festgestellt werden ([Sti05]), was zum einen den Längsregelaufwand des Fahrers reduziert, zum anderen aber auch bewusst zu kürzeren Verweildauern der Füße auf der Pedalerie führt⁶. Eine Tendenz zur Wegnahme des Fußes von der Pedalerie bei aktiviertem Tempomat konnte in Befragungen festgestellt werden ([PSoL⁺10]).

Am Lenkrad sind hingegen Bemühungen zu erkennen, den Fahrerkontakt weiter zu intensivieren. Insbesondere ergonomische Überlegungen haben zu der Entwicklung von Schaltern und Tastern geführt, welche in das Lenkrad integriert werden und eine Bedienung durch den Fahrer ermöglichen, ohne dass dieser die Hände vom Lenkrad nehmen muss. Mit diesen Bedienelementen werden insbesondere menügestützte Systeme (z.B. Auswahl in Telefonbüchern oder Ortslisten von Navigationssystemen) oder Komfortfunktionen (z.B. Audioeingaben) gesteuert ([ABS06]). Verbreitet sind mittlerweile auch s.g. Schaltpaddel oder Schaltwippen an der Rückseite des Lenkrads, welche das Ausführen von Gangwechselfunktionen in einem halbautomatischen Getriebe ohne Wegnahme der Hände vom Lenkrad ermöglichen. Überlegungen gehen sogar dahin, Richtungswechselanzeigen durch seitlich in den Lenkradring integrierte drucksensitive Elemente zu realisieren ([Jan03]). Es wird angenommen, dass durch diese Entwicklungen nicht nur allgemein

⁵Von der reinen Nutzung des Pedals als „Fußablage“, ohne aktiv eine Aktion auszuführen, wird hierbei abgesehen.

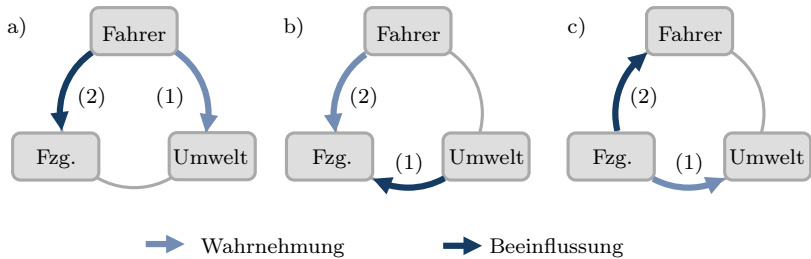
⁶Beschreibung BMW Cruise Control, http://www.bmw.com/com/de/newvehicles/x1/x1/2009/allfacts/ergonomics/dynamic_cruise_control.html, Abrufdatum 01.04.2011: „Gönnen Sie Ihrem Gas- und Bremsfuß eine wohlverdiente Pause. [...] Ab 30 km/h kann der Fahrer [...] die aktuell gefahrene Geschwindigkeit übernehmen und verändern, ohne dabei einen Fuß auf ein Pedal zu setzen.“

die absolute Verweildauer der Hände am Lenkrad zunimmt, sondern speziell auch die beidhändige Lenkradhaltung in der „Viertel-vor-Drei“-Stellung⁷ gefördert wird, welche allgemein als sicher angesehen wird ([Bro02], [DWBLE10], [WT05]).

Das aus dem dauerhaften Fahrerkontakt resultierende Potential des Lenkrads für die haptische Informationsübertragung wird auch in der Literatur festgestellt, wie folgendes Zitat von Schumann zeigt: „[. . .] however such a permanent contact is assured in the case of the steering wheel for controlling driving actions" ([Sch93], S.31). Bei der haptischen Reizung am Lenkrad ist weiterhin vorteilhaft, dass die Hände zumeist direkt (nackt) mit diesem in Kontakt sind, mechanische Stimuli den Fahrer also ungedämpft erreichen ([HR10]). Im Gegensatz dazu werden bspw. Stimuli am Fahrersitz durch Kleidung gedämpft, wobei eine zusätzliche Varianz durch saisonale Bekleidungsunterschiede auftritt ([GST⁺08]). Dass die Hände die einzigen nackten Kontaktstellen des Fahrers mit dem Fahrzeug darstellen, wird auch in [CL07] erkannt, wo der Einsatz physiologischer Sensoren im Fahrzeug untersucht wird. In einem prototypischen Aufbau konnten hier Blutdruck, Hautleitfähigkeit und Hauttemperatur durch Sensoren am Lenkrad (in der „Viertel-vor-Drei“-Position) aufgezeichnet und durch Referenzmessungen als hinreichend genau validiert werden.

Neben seiner Primärfunktion als Aktor übernimmt das Lenkrad die „[. . .] Funktion eines haptischen Sensors hinsichtlich verschiedener für die Fahrzeugführung relevanter Informationen“ ([Bus03], S.11). So werden dem Fahrer über das Lenkmoment bspw. Informationen über den Fahrzustand (z. B. über das Erreichen fahrdynamischer Grenzbereiche), den Straßenzustand, etwaige Störungen wie z. B. Seitenwind, und über den Lenkvorgang selbst übermittelt ([Bus03]). Giacomini & Woo stellen fest, dass Fahrer in der Lage sind, die beim Überfahren verschiedener Untergründe entstehenden Lenkradvibrationen den richtigen Untergründen zuzuordnen, wenn die Vibrationen synthetisch in einer Labor-

⁷Die Handposition am Lenkrad wird entsprechend dem Ziffernblatt einer analogen Uhr durch die Angabe einer Uhrzeit ausgedrückt, wobei die linke Hand dem Minutenzeiger und die rechte Hand dem Stundenzeiger entspricht, vgl. Abschnitt 3.3.3.

**Abb. 2.4.: Funktionen des Lenkrads:**

a) *Aktor*: Der Fahrer nimmt die Umgebung wahr (1) und beeinflusst das Fahrzeug über das Lenkrad (2); b) *Sensor*: Umwelteinflüsse auf das Fahrzeug (1) nimmt der Fahrer über das Lenkrad wahr (2); c) *Informationsträger*: Das Fahrzeug sensiert die Umgebung (1) und informiert den Fahrer über haptische Signale in der Lenkung (2).

umgebung appliziert werden ([GW04], [GW05a], [GW05b], [WG06]). Auch das Überfahren von Objekten wie bspw. Steinen auf der Fahrbahn wird dem Fahrer haptisch am Lenkrad rückgemeldet ([HM02], [BSG05]). Einflüsse der Reifen-Fahrbahn-Interaktion auf die mechanische Anregung des Lenksystems werden bspw. in [PMLT86] und [MK98] beschrieben. Weiterhin sind die Subsysteme *Bremse* (z. B. „Bremsrubbeln“ durch Bremsdruck- und -momentschwankungen, [ABG99]) und *Motor* ([AG03], [AG05], [AG09b]) ursächlich für natürliche haptische Lenkradanregungen. Zusätzlich zu diesen beschriebenen Rollen als Aktor und Sensor natürlicher haptischer Information ist das Lenkrad potentieller Träger synthetischer haptischer Information, wie Abb. 2.4 visualisiert.

Zusammenfassend behandelt diese Arbeit implizite haptische Signale, die basierend auf einer Systementscheidung generiert und mit fest im Fahrzeug integrierbarer Aktorik dargeboten werden. Unter den potentiellen Applikationsorten erscheint die Lenkung vorteilhaft, da es sich hierbei um ein primäres Stellelement mit zumeist direktem, d. h. ungedämpftem, sowie dauerhaftem Fahrerkontakt handelt. Aufgrund der

Übereinstimmung von Reiz- und Handlungsort werden Interpretationsvorteile erwartet, wenn haptische Signale in der Lenkung zur Beeinflussung einer Fahrerreaktion bzgl. der Fahrzeugquerführung eingesetzt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird deshalb die haptische Signalisierung durch synthetische Reize in der Lenkung fokussiert.

3. Grundlagen

3.1. Synthetische haptische Signale in der Lenkung

3.1.1. Erzeugung und Klassifikation

Propriozeptive und taktile Signale

Für die weiteren Ausführungen wird die Lenkanlage vereinfacht durch die aggregierten Baugruppen *Lenkrad*, *Lenksäule* sowie *Lenkachse* dargestellt. Bei der Erzeugung synthetischer haptischer Signale in der Lenkung wird im Rahmen dieser Arbeit zwischen propriozeptiven und taktilen Signalen¹ unterschieden. Propriozeptive Signale sind mechanische Anregungen bzgl. der Lenksäule in Form von Lenkmomenten, die im unfixierten Fall, d. h. ohne Fahrerkontakt mit dem Lenkrad, zu erzwungenen Drehungen des Lenkrads führen können (s. Abb. 3.1 *links*). Bei taktilen Signalen erfolgt die Signalisierung „am Lenkrad“, wobei insbesondere der Lenkradring fühlbar mechanisch angeregt wird, ohne dass das Lenkrad Drehbewegungen bzgl. der Lenksäule ausführt (s. Abb. 3.1 *rechts*). Diese Differenzierung ist insbesondere aus physiologischer Sicht motiviert. Während Momente bzgl. der Lenkachse primär² propriozeptiv mit Rezeptoren in den Armmuskeln und -gelenken wahrgenommen werden, werden Anregungen am Lenkrad vordergründig mit den für die taktile Wahrnehmung zuständigen Mechanosensoren der Haut sensiert (vgl. Abschnitt 3.2.1).

¹streng genommen ist das Signal nicht propriozeptiv (bzw. taktil oder haptisch) sondern mechanisch. Lediglich dessen Wahrnehmung erfolgt propriozeptiv (bzw. taktil oder haptisch).

²Insbesondere bei niederamplitudiger Anregung werden propriozeptive Signale auch taktil über Hautdehnungen wahrgenommen, ohne dass eine Bewegung des Hand-

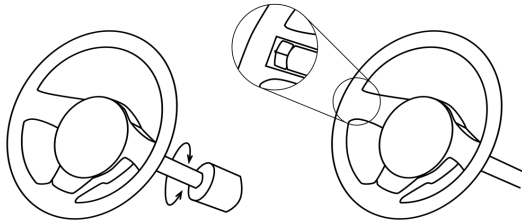


Abb. 3.1.: Schematische Darstellung der Erzeugung propriozeptiver und taktiler Signale in der Lenkung:

links: Erzeugung propriozeptiver Signale durch Momentenanregung; *rechts:* Erzeugung taktiler Signale bspw. durch einen in das Lenkrad integrierten Unwuchtmotor (Hinweis: die Position des Unwuchtmotors ist beispielhaft für beliebige andere Positionen).

Diese Klassifikation findet sich in der in [Bou85] vorgenommenen Unterscheidung haptischer Anzeigen in der Lenkung wieder. Demnach sind Anzeigen, bei denen die vermittelte Information eine *bewusste* Reaktion hervorruft, von solchen Anzeigen abzugrenzen, die eine *reflexartige* Reaktion bewirken. Während erstere nach [Bou85] den Berührungs-, Druck- oder Vibrationssinn ansprechen müssen (taktile Wahrnehmung), werden letztere durch Stellungs- und Kraftsinn sensiert (propriozeptive Wahrnehmung). Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass mithilfe propriozeptiver Signale durchaus auch bewusste Reaktionen erzeugt werden können, reflexartige Reaktionen aber *nur* durch propriozeptive Signale bewirkt werden können (vgl. Abschnitt 3.2.3). Dabei ist durchaus kritisch zu hinterfragen, ob das Überstimmen des Fahrers durch das Auslösen einer Reflexreaktion im Fahrzeug erwünscht ist.

Erzeugung haptischer Signale in der Lenkung

Synthetische Lenkmomente werden üblicherweise durch einen elektrischen Motor in der Lenkanlage realisiert. Vorteilhaft ist hier die Verwen-

dung des Motors einer elektrischen Servolenkung (EPS: *Electrical Power Steering*, s. [Ise06]), wie bspw. in [MMM06] und [PE03] vorgenommen. Es ist aber auch möglich, Lenkanlagen ohne elektrische Servounterstützung (z. B. hydraulische Servolenkungen) mit einem zusätzlichen Elektromotor zur Momentengenerierung auszustatten (z. B. [SGK⁺98], [SKA00]). Synthetische Lenkmomente können demnach mit geringem bzw. bei vorhandener EPS ohne zusätzlichen Hardwareaufwand generiert werden. Eine weitere Möglichkeit wird von Bielaczek und Kollegen beschrieben, die einen Umkehrhubmagneten am Lenkrad zur Erzeugung alternierender Lenkmomente einsetzen ([BBB⁺96], [Bie98]).

Solange keine vollständige mechanische Entkopplung von Lenkrad und Lenkachse vorgenommen werden kann, wirken synthetische Lenkmomente auch auf die gelenkte Achse zurück und können die gefahrene Trajektorie beeinflussen. Dadurch werden dem Fahrer, der die entstehenden Querbeschleunigungen vestibulär wahrnimmt, Informationen über einen weiteren Kanal zur Verfügung gestellt. Haptische Signale mit Rückwirkung auf die Fahrzeugbewegung werden deshalb auch als haptisch-vestibuläre Signale bezeichnet (vgl. [BK01]³). Ein bzgl. der Fahrdynamik vollständig rückwirkungsfreies Design synthetischer Lenkmomente wird bspw. beim Einsatz von Steer-by-Wire (SbW) Systemen ermöglicht. Obwohl die in Zulassungsvorschriften geforderte mechanische Rückfallebene den Einsatz derartiger Systeme erschwert ([Dil99]) und deren Notwendigkeit nach Einführung der aktiven Lenkung generell in Frage gestellt wird ([HE07]), sehen Studien den vermehrten Einsatz von SbW-Systemen in künftigen Fahrzeugen ([RAZ04], [o.V03]).

Die gängige Methode zur Realisierung taktiler Signale in der Lenkung sieht die Anbringung eines oder mehrerer Unwuchtmotoren im Lenkrad zur Erzeugung von Vibrationen vor, die am gesamten Lenkrad spürbar sind⁴. Mehrere Unwuchtmotoren kommen insbesondere dann zum Ein-

³Buld & Krüger verwenden die Bezeichnung „haptisch-kinästhetisch“, wobei die kinästhetische Wahrnehmung das Beschleunigungsempfinden meint ([BK01]). Der Begriff „kinästhetische Wahrnehmung“ wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht verwendet (s. Abschnitt 2.2).

⁴z. B. TRW Vibrationslenkrad, http://www.trw.com/media_center/technology_information, Abrufdatum 01.04.2011.

satz, wenn die Vibrationen nicht am gesamten Lenkrad, sondern örtlich verteilt appliziert werden sollen (vgl. Abschnitt 3.3). Denkbar ist weiterhin eine taktile Anregung am Lenkrad über Piezoelemente. Der reziproke Piezoeffekt bewirkt eine spürbare Ausdehnung dieser Elemente bei angelegter Spannung. Vorteilhaft ist hier zum einen der lokal begrenzte Wirkbereich, welcher das Übermitteln ortsspezifischer Information zulässt. Zum anderen können die Aktoren durch Nutzung des Piezoeffekts gleichzeitig zur Sensierung von Druckkräften eingesetzt werden, die vom Fahrer am Lenkrad aufgebracht werden. Die mechanische Ausdehnung von Piezoelementen ist mit ca. 1 bis 4‰ der Materialdicke relativ gering, kann durch die geschichtete Anordnung mehrerer Lagen jedoch erhöht werden ([Rie09]).

Speziell für Forschungszwecke können Lenkradvibrationen auch über Körperschallerzeuger generiert werden, die bspw. in [GO99], [GSDR04] und [HM04b] an der Lenksäule angebracht werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Studien zum Einfluss von Variationen der Parameter synthetischer Lenkradvibrationen durchgeführt (s. Abschnitt 3.4.2). Hierbei wurde ein Körperschallerzeuger mittig auf dem Lenkrad aufgebracht, wodurch Vibrationen in einem breiten Frequenz- und Beschleunigungsbereich generiert werden konnten. Weiterhin sind die in Abschnitt 3.3.2 angeführten prototypischen Aufbauten mit pneumatischer Anregung bzw. umlaufenden Kugel- oder Flüssigkeitswellen nach derzeitigem Stand lediglich zu Forschungszwecken einsetzbar.

Klassifikation und Nomenklatur

Kullack und Kollegen stellen allgemein eine große Variabilität sowie fehlende einheitliche Definitionen auf dem Gebiet der Querführungsassistenz fest ([KEE09]). Ebenso kann für die in der Literatur publizierten haptischen Signale am Lenkrad ein geringer Konsens hinsichtlich der verwendeten Signalbezeichnungen festgestellt werden. Für die vorliegende Arbeit wird aus diesem Grund eine vorläufige⁵ Klassifika-

⁵Die Nomenklatur beruht zu großen Teilen auf Ergebnissen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien (vgl. Abschnitt 7.2.2 ab S. 117). Durch weitere

tion (und Nomenklatur) vorgeschlagen, die fünf Signalformen differenziert: gerichtetes Lenkmoment, Lenkgegenruck, (symmetrisches) Lenkradrütteln, Lenkradrütteln mit Richtungsmoment sowie (nondirektionale) Lenkradvibration. Während Signale der ersten vier Kategorien über synthetische Lenkmomente erzeugt werden und damit zu den propriozeptiven Signalen zu zählen sind, werden taktile Lenkradvibrationen über Unwuchtmotoren erzeugt.

Durch das Aufprägen eines **gerichteten Lenkmoments** erhält der Fahrer eine Information über die Richtung einer aus Systemsicht notwendigen Lenkhandlung (s. Abb. 3.2a). Hierunter fallen sowohl kurze, ruckartige Lenkimpulse als auch bspw. rechteck- oder rampenförmig applizierte Lenkmomentverläufe. In seiner Arbeit fokussiert Schmidt die Gestaltung derartiger Signale, denen er das größte Potential einer Fahrerbeeinflussung bzgl. der Fahrzeugquerführung beimisst ([Sch09]). Dabei wird insbesondere die Anstiegssteilheit von Zusatzlenkmomenten untersucht. **Lenkgegenrücke** werden im Konzept „ReflektAS“ ([KEE07], [KELE08], [KEE09]) eingesetzt, um reflexartige Lenkreaktionen in die entgegengesetzte Richtung auszulösen (s. Abschnitt 3.2.3).

Die Unterscheidung propriozeptiver und taktiler Signale wird insbesondere bei den Signalen „Lenkradrütteln“ und „Lenkradvibration“ relevant. Als **Lenkradrütteln** werden solche Anregungen bezeichnet, die den Fahrer durch alternierende Lenkmomente auf die Notwendigkeit einer Reaktion am Lenkrad hinweisen (s. Abb. 3.2b). Diese Signale werden in der Literatur zumeist als Lenkradvibration bezeichnet (z. B. [MP04], [SJ03], [TJP⁺96]). In der vorliegenden Arbeit wird hiervon Abstand genommen, und die Bezeichnung „Lenkradvibrationen“ für solche Signale verwendet, die durch Unwuchtmotoren erzeugt werden (s. u.). Durch diese Differenzierung soll eine am Begriff „Vibration“ angelehnte Bezeichnung eines momentenbasierten Rüttelsignals nicht pauschal als ungeeignet abgelehnt werden. Insbesondere im oberen Frequenzbereich wird ein Rütteln als „Vibration“ wahrgenommen. Die Unterscheidung dient vielmehr als konsistente Basis für die weitere Diskussion im Rahmen

Erkenntnisse dieser Arbeit wird die hier angeführte Klassifikation im weiteren Verlauf ergänzt.

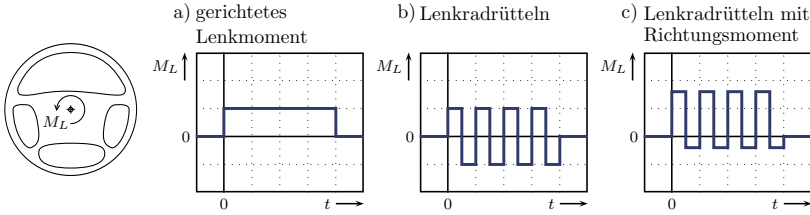


Abb. 3.2.: Zeitverläufe der Lenkmomentsignale:

Zeitverläufe der propriozeptiven Signale *gerichtetes Lenkmoment*, *Lenkradrütteln* sowie *Lenkradrütteln mit Richtungsmoment* (die rechteckförmigen Momentenverläufe stehen beispielhaft für beliebige Anregungsformen, wie bspw. rampenförmig ansteigende Lenkmomente oder sinusförmiges Rütteln).

dieser Arbeit. Ein weiteres Differenzierungsmerkmal von Lenkradrüttelsignalen und Lenkradvibrationen ist die „Vibrations“-richtung, die bei Rüttelsignalen mit der Drehrichtung des Lenkrads zusammenfällt, während Lenkradvibrationen in alle Raumrichtungen propagieren. Die Notwendigkeit der begrifflichen Unterscheidung wird zudem durch den Frequenzbereich der Anregung hervorgehoben, welcher bei Rüttelsignalen aufgrund mechanischer Restriktionen auf ca. 20 Hz beschränkt ist, wohingegen mit Unwuchtmotoren Vibrationen im Bereich von 200 Hz und höher erzeugt werden können.

Als **Lenkradrütteln mit Richtungsmoment** werden Signale bezeichnet, bei denen dem Lenkradrütteln ein (konstantes) gerichtetes Lenkmoment überlagert ist (s. Abb. 3.2c). Hierdurch erhält das ansonsten nondirektionale Rütteln eine Richtungsinformation. In der Literatur wird diese Überlagerung zumeist durch die Signalbezeichnung hervorgehoben (z. B. „Moment und überlagerte Vibration“ ([Kop94]), „steering wheel vibration and torque“ ([KPB⁺06])). Durch die von Navarro und Kollegen verwendete Signalbezeichnung „motor priming“ soll ausgedrückt werden, dass das Signal die gewünschte motorische Reaktion des Fahrers gezielt erregt, wodurch Interpretations- und Reaktionsvorteile erwartet werden ([NMH⁺06], [NMH07], [NMF⁺08], s. auch [EJFN⁺08]).

Als **Lenkradvibrationen** werden in dieser Arbeit Anregungen bezeichnet, die durch in das Lenkrad integrierte Unwuchtmotoren erzeugt werden und primär taktil wahrgenommen werden. Derartige Anregungen unterscheiden sich erheblich vom (symmetrischen) Lenkradrütteln. An dieser Stelle sei erneut auf den geringen Konsens in der allgemeinen Verwendung des Begriffs „Lenkradvibration“ in der Literatur hingewiesen, und vor der Annahme der Allgemeingültigkeit von bisherigen in Studien gewonnenen Erkenntnissen zu Lenkradvibrationen gewarnt.

3.1.2. Haptische Spurverlassenswarnung in der Lenkung

Allgemeiner Überblick und publizierte Studien

Beurteilt an der Anzahl vorgeschlagener Signale und publizierter Studien stellen Spurverlassenswarnsysteme (LDW(S): *Lane Departure Warning (System)*)⁶ das vermeintlich primäre Anwendungsgebiet haptischer Signale in der Lenkung dar (s. auch [Gay09]). Damit einher geht allerdings auch ein sehr geringer Konsens über Anforderungen an und Ausprägungen von haptischen Lenkradsignalen zur Warnung vor drohendem Spurverlassen. Aufgrund dessen werden haptische Spurverlassenswarnanzeigen in den Fokus dieser Arbeit gestellt.

Ein LDWS ist ein elektronisches FAS, welches die Position des eigenen Fahrzeugs innerhalb der Spur erfasst und den Fahrer bei drohendem Spurverlassen warnt. LDWS werden typischerweise erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit aktiviert, und warnen nur bei nicht betätigtem Fahrtrichtungswechselanzeiger ([HPF05]). Die Warnung erfolgt visuell, akustisch, haptisch oder mit beliebig daraus kombinierten multimodalen Signalen, wobei sowohl haptische Signalisierungen am Lenkrad als auch akustische Warnungen empfohlen werden ([HPF05]). Bereits

⁶Die Funktion Spurverlassenswarnung wird von OEM unter verschiedenen Bezeichnungen geführt. Im weiteren Verlauf werden die Funktionsbezeichnungen der Robert Bosch GmbH verwendet.

Ende der 90er Jahre wurden die ersten kommerziellen Spurverlassenswarnsysteme für Nutzfahrzeuge auf Basis vorangegangener Forschungsprojekte (insbesondere das von der EU geförderte PROMETHEUS⁷ Projekt) entwickelt ([Gay09]). In der Zwischenzeit haben alle namhaften Automobilhersteller derartige Systeme eingeführt bzw. deren Einführung angekündigt. Für Zusammenfassungen sei auf [Bus03], [CRBM07], [Gay09], [Ros06] oder [Sch09] verwiesen.

Die Motivation für den Einsatz von LDWS ist durch deren Wirkungsbereich begründet ([Gay09]). Unfälle durch Spurverlassen stellen außerorts mit 34 bis 35% den größten Anteil aller Unfälle im Straßenverkehr in Deutschland in den Jahren 2003 bis 2009 dar⁸ (ähnliche Zahlen gelten auch in anderen Ländern, z. B. [CJP97], [GMJHG⁺04], [KPB⁺06], [NMF⁺08], [PU03], [PE03], [SSD05]). Absolute Zahlen zu Unfallohäufigkeiten und Verunglückten durch Abkommensunfälle sind in Abb. 3.3 dargestellt, wo auch der Rückgang der Unfallzahlen⁹ abgelesen werden kann. Während im Jahr 2003 auf deutschen Straßen 57.191 Abkommensunfälle mit insgesamt 73.566 Verunglückten (davon 2.356 tödlich) verzeichnet wurden, reduzierte sich die Anzahl bis 2009 auf 48.001 Abkommensunfälle mit 59.849 Verunglückten (davon 1.400 tödlich).

Zur Bewertung der Spurverlassensgefahr wird häufig der s. g. TLC-Ansatz verwendet. Bedingung für die Warnauslösung ist hierbei das Unterschreiten einer bestimmten Schwelle der kalkulierten Zeit bis zum Überfahren der Spurmarkierung (TLC: *Time to Lane/Line Crossing*, z. B. [GMJHG⁺04]). Ein alternativer Ansatz bewertet mit der Spurablage des Fahrzeugs lediglich die laterale Position innerhalb der Spur. Die Warnung erfolgt, wenn der Fahrer ein virtuelles Nagelband¹⁰ überfährt. Als Nagelbänder werden in die Straße eingefräste Strukturen neben der Spurmarkierung bezeichnet, deren Überfahren dem Fahrer hör-

⁷ *PROgramMe for a European Traffic of Highest Efficiency and Unprecedented Safety*.

⁸ Statistisches Bundesamt: Anteil der Unfälle mit Personenschaden durch „Abkommen von der Fahrbahn“.

⁹ Statistisches Bundesamt: Entwicklung der Unfallzahlen im Straßenverkehr.

¹⁰ auch Rüttelstreifen, Übersetzung des englischen Begriffs „*rumble strip*“.

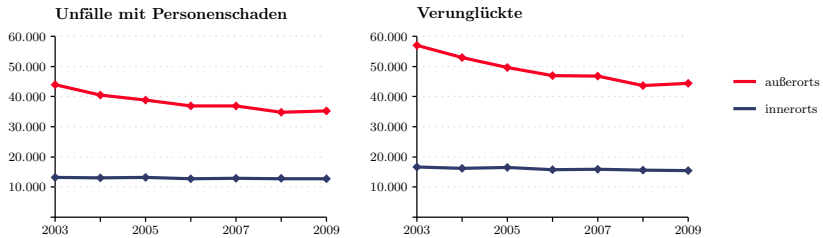


Abb. 3.3.: Statistiken zu Unfällen der Unfallart „Abkommen von der Fahrbahn“:

Anzahl der Unfälle mit Personenschaden (*links*) sowie Anzahl der Verunglückten (*rechts*) in den Jahren 2003 bis 2009 (Quelle: Statistisches Bundesamt).

und spürbar als s. g. „Nagelbandrattern“ signalisiert wird. Die unfallreduzierende Wirkung solcher baulichen Maßnahmen konnte bereits nachgewiesen werden (z. B. [AKV⁺08], [Hic97], [Mor03a]). Dieser Ansatz wird auch als RBS-Ansatz (*Rumble Strip*) bzw. VRBS-Ansatz (*Variable Rumble Strip*) bezeichnet, wenn die Lage des virtuellen Nagelbands situativ angepasst wird ([Pil97], [PU98], [PU03]).

Die Auswertung der Fahrzeugposition innerhalb der Spur erfolgt zumeist auf Basis einer videobasierten Detektion der Spurmarkierungen (z. B. [BTT⁺96], [CJP97], [Pom95]), welche insbesondere durch unkontrollierbare Umwelteinflüsse beeinträchtigt werden kann. Weiterhin kann die Spurmarkierung – allerdings erst kurz vor dem Überfahren – mithilfe von zur Straße gerichteter Infrarotsensorik erkannt werden, wobei insbesondere zusätzliche Markierungen in Baustellenbereichen problematisch wirken ([Gay09]). Dadurch bedingte Fehlerkennungen der Spur erfordern eine gewisse „Fehlertoleranz“ des Fahrers bei Falschwarnungen und damit eine sorgfältige Wahl und Parametrierung des Warnsignals als Schnittstelle zwischen System und Mensch.

Frühe Studien zum Einsatz gerichteter Lenkmomente zur Warnung vor drohendem Spurverlassen durch Ziegler und Kollegen im Fahr Simulator waren auf Anwendungen im Lkw-Umfeld ausgerichtet ([ZFRK95],

[BCLM98]). Eine neuere Studie mit gerichteten Lenkmomenten ebenfalls für die Anwendung im Lkw wird in [MMM06] beschrieben. In den in [KPB⁺06], [Mar01]¹¹ sowie [TJP⁺96] beschriebenen Studien werden gerichtete Lenkmomente mit weiteren Warnsignalen verglichen. Sowohl Sato und Kollegen ([SGK⁺98], [SKA00]) als auch Mann & Popken ([MP04]) untersuchen gerichtete Lenkmomente als Spurverlassenswarnsignale im Fahrsimulator und in Realfahrzeugstudien. Eine weitere Realfahrzeugstudie wird in [ABD96] vorgestellt. In der in [PE03] beschriebenen Studie auf der Teststrecke sollten die Vpn gerichtete Lenkmomente bewerten und gemäß ihren Bedürfnissen anpassen.

Zum Einsatz von Lenkradrüttelsignalen als Spurverlassenswarnsignale wurden bislang fast ausschließlich Studien im Fahrsimulator publiziert. Die ersten Studien werden in [ZFRK95] (s. auch [BCLM98]) sowie [Rot95] beschrieben. In [TJP⁺96] wird u. a. der Einfluss zusätzlicher akustischer Warnungen zum haptischen Lenkradrütteln untersucht. Aktuellere Studien fokussieren insbesondere auf den Vergleich von Rüttelsignalen mit anderen (haptischen, visuellen oder akustischen) Warnsignalen ([SJ03], [MP04], [NMH⁺06], [NMH07]). Die einzig bekannte Realfahrzeugstudie ist in [ABD96] beschrieben.

Erste Studien zum Lenkradrütteln mit Richtungsmoment wurden von Kopf auf der Teststrecke, sowie Rothe im Fahrsimulator durchgeführt ([Kop94], [Rot95]). Eine weitere Studie mit diesem Warnsignal im Realfahrzeug wird in [MOWI00] beschrieben. Weiterhin werden Lenkradrüttelsignale mit Richtungsmoment in den bereits genannten Vergleichsstudien ([SJ03], [KPB⁺06]) untersucht. Eine neuere Studie wurde von Navarro und Kollegen durchgeführt ([EJFN⁺08], [NMH07], [NMF⁺08]). Hierbei handelt es sich auch um die einzig bekannte Studie, die Lenkradvibrationen als Spurverlassenswarnsignale untersucht. Über Frequenz- und Beschleunigungswerte des von den Autoren als „wheel vibratory warning“ bezeichneten Warnsignals werden keine Angaben gemacht.

¹¹Marsteller untersucht zusätzlich die Wirkung randaktiver Lenkradvibrationen. Da deren Realisierung (Oszillation oder Vibration durch Unwuchtmotoren) nicht beschrieben wird, kann dieses Konzept in der vorliegenden Zusammenfassung nicht betrachtet werden.

Erkenntnisse aus vorhandenen Studien

In Anhang A.1 sind alle im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Studien zu haptischen Spurverlassenswarnsignalen in der Lenkung aufgeführt. Diese Studien unterscheiden sich zum Teil erheblich hinsichtlich der Parametrierung der Warnsignale, der Studienart (Fahr Simulator, Teststrecke, Straßenverkehr), der Stichprobengröße ($n = 3$ bis 64 Versuchspersonen (Vpn)), sowie der Provokation der Warmauslösung (vom selbstinitiierten Lenken in Richtung Spurrand bis zu Spurverlassen durch induzierte Schläfrigkeit), was deren Vergleichbarkeit erschwert. Dennoch können allgemeine Hinweise abgeleitet werden, die als Basis der Hypothesenbildung der vorliegenden Arbeit dienen (s. auch [BAM11]).

Wie synthetische akustische Signale im Fahrzeug durch Hintergrundgeräusche überlagert werden, interferieren auch synthetische Lenkmomente mit „natürlichen“ Lenkmomentanregungen, wie bspw. dem fahrtinduzierten Rückstellmoment. Dies erschwert das Erkennen der zusätzlichen haptischen Information. In [KPB⁺06] werden bspw. 32% der Lenkmomentwarnungen nicht bewusst wahrgenommen. Gleichzeitig werden 33% aller Fahrerreaktionen durch wahrgenommene Lenkmomente ausgelöst, die tatsächlich nie appliziert wurden. Ein Ansatz besteht nun darin, synthetische (gerichtete) Lenkmomente durch Lenkradrüttelsignale zu überlagern, wodurch sich erstere deutlicher von natürlichen Anregungen abheben: „Da das Warnmoment im normalen Fahrbetrieb nicht ohne weiteres von niederfrequenten Störeinflüssen [...] unterscheidbar ist, wurde ihm eine sinusförmige Vibration¹² [...] überlagert, um es als solches zu kennzeichnen [...]“ ([Kop94], S. 128).

Eine weitere Motivation für die Überlagerung von Lenkmomenten mit Lenkradrütteln ist die Addition einer Richtungsinformation zum Rütteln, welches alleine nicht über die Richtung des notwendigen Lenkeingriffs informiert. Wenngleich Hinweise darauf bestehen, dass Fahrer die Information über die notwendige Reaktionsrichtung nicht aus direktionalen Warnsignalen sondern visuell durch den Blick auf die Straße einho-

¹²Hierbei handelt es sich nach der Definition dieser Arbeit um ein Lenkradrütteln.

len ([SJ03]), ist der in [Rot95] durchgeführten Umfrage zufolge das Fehlen einer Richtungsinformation einer der Hauptmängel eines symmetrischen Lenkradrüttelns im Vergleich zum Rütteln mit Richtungsmoment. Auch in [TJP⁺96] wird berichtet, dass die Vpn direktionale Warnsignale gegenüber nondirektionalen Ausprägungen bevorzugen: „The subjective data are rather clear-cut with respect to directionality. Based on subjective impressions, directional presentation of warnings should be implemented instead of their nondirectional analogs“ ([TJP⁺96], S. 11). Hinweise auf eine subjektive Präferenz direktonaler Warnsignale finden sich auch in [EJFN⁺08] (s. auch [NMF⁺08], [NMH07]).

Ziegler und Kollegen ([ZFRK95], s. auch [BCLM98]) berichten von Fehlreaktionen, die durch Lenkimpulse ausgelöst werden. Demnach reagierten einige Vpn auf gerichtete Lenkmomentrücke mit einem Gegenlenken zu der durch das Moment signalisierten Richtung. Noch deutlicher wurden derartige, aus Fehlinterpretationen resultierende ungewünschte Reaktionen bei Lenkradrüttelsignalen mit Richtungsmoment beobachtet. In [Kop94] wird 7% der haptisch übertragenen Richtungsinformation falsch interpretiert. Suzuki & Jansson berichten von deutlich höheren Anteilen, wonach bei Erstkontakt mit dem Warnsignal 50% aller Reaktionen gegen das Lenkmoment gerichtet waren ([SJ03]). Durch Instruktion der Signalbedeutung konnte dieser Anteil zwar reduziert werden, jedoch nicht unter 25%. Nach Meinung der Autoren ist ein ruckartiges Lenkmoment konsistent mit dem mentalen Modell der Fahrzeugreaktion auf Seitenwind, woraus das korrigierende Gegenlenken resultiert.

Während die eben beschriebene Assoziation zu einer bekannten Fahrsituation eher hinderlich ist, können hilfreiche Analogien durch den Einsatz von Lenkradvibrations- oder -rüttelsignalen hervorgerufen werden. Diese werden häufig mit dem Phänomen des Nagelbandratterns assoziiert, welches entsteht, wenn das Fahrzeug seitlich neben der Spur eingefräste Rüttelstreifen überfährt (vgl. Fußnote 10 auf S. 24). Mit einem solchen Warnsignal wird Fahrern demnach gleichzeitig der Grund für die Warnung (Spurverlassen) übermittelt. Es wird angenommen, dass diese Analogie die Transparenz des Warnsystems erhöht, und damit die richtige Reaktion beim Fahrer hervorruft ([EJFN⁺08], [KPB⁺06], [NMH07],

[NMF⁺08]). Auch akustische Spurverlassenswarnsignale (unimodal oder als Teil einer multimodalen Warnung) werden häufig als akustisches Nagelbandrattern realisiert (z.B. [BCLM98], [JSWY07], [MDWB04], [NMH07], [NMF⁺08], [RGRD05], [Rot95], [ZFRK95]), da reales Nagelbandrattern auch (und evtl. primär) akustisch wahrgenommen wird.

Werden Lenkmomente zu gering dimensioniert, ist deren Wahrnehmbarkeit ggf. nicht mehr sichergestellt, insbesondere bei der Überlagerung mit natürlichen fahrtinduzierten Lenkmomenten. Dahingegen sind zu stark dimensionierte Lenkmomente durch den stärkeren Eingriff in die Fahrzeugquerführung nicht nur im Fehlerfall kritisch, sondern wirken auch aufdringlicher und störender auf den Fahrer. Die subjektive Bewertung der Lenkmomentstärke unterliegt dabei z. T. starken individuellen Schwankungen. In der in [PE03] beschriebenen Studie sollten die Vpn die Stärke eines gerichteten Spurverlassenswarnmoments nach ihren Präferenzen einstellen. Während 8 der 28 Vpn stärkere Lenkmomente wählten (bis zu 150% des von den Autoren vorgegebenen Nominalwertes), entschieden sich 3 Vpn für deutlich schwächere Lenkmomente (bis zu lediglich 30% des Nominalwertes).

Auf 1000 km Autofahrt erkennen LDWS im Schnitt 50 bis 80 drohende Spurverlassensereignisse (alle 12 bis 20 km) und leitet die Warnausgabe ein ([Bre09]). Aufgrund der breiteren Abmessungen kann bei Lkw von noch mehr Ereignissen ausgegangen werden, was durch ein bewusst randnahes Fahren in einigen Situationen noch verstärkt wird. Falschwarnereignisse bzw. Warnungen, die subjektiv als unnötig empfunden werden, ergeben sich bspw. durch Mehrfachmarkierungen in Baustellenbereichen, durch beabsichtigtes Kurvenschneiden der Fahrer oder durch Spurwechselmanöver ohne vorheriges Anzeigen des Fahrtrichtungswechsels. Deutlich wird, dass das Ausbleiben einer Warnung (wie bei Fahrzeugen ohne LDWS) in den meisten Fällen nicht zu einem tatsächlichen Spurverlassen führt. Umso wichtiger ist wie bereits erwähnt eine gewisse „Fehlertoleranz“ des Fahrers gegenüber Warnungen, die als unnötig wahrgenommen werden. Ein subjektiv als störend empfundenen und in der Folge deaktiviertes LDWS kann offenkundig keinen objektiven Nutzen in der tatsächlich kritischen Situation haben. Insbesondere die Pri-

vatheit haptischer Signale, die von Beifahrern nicht bemerkt werden und damit keine Rückschlüsse auf etwaige Unzulänglichkeiten oder Fahrfehler des Fahrers zulassen, wird häufig als akzeptanzfördernder Faktor genannt (s. Abschnitt 2.3).

In der in [ABD96] beschriebenen Probandenstudie wurden akustische Warnsignale gegenüber haptischen Signalen allerdings bevorzugt, auch weil letztere nach Meinung der Vpn weniger komfortabel, verlässlich und entspannend wirkten. Die Vpn der in [Kop94] beschriebenen Studie bewerten den Eingriff des LDWS zwar als berechtigt, das haptische Warnsignal (Lenkradrütteln mit Richtungsmoment) wird aber eher erschreckend als beruhigend und eher unangenehm als angenehm empfunden. Auch in [NMH07] (s. auch [EJFN⁺08], [NMF⁺08]) konnte ein objektiver Nutzen des Lenkradrüttelns mit Richtungsmoment nachgewiesen werden, wenngleich dieses im Vergleich mit anderen Warnsignalen (akustische Warnung, Lenkrad- und Sitzvibration) am wenigsten akzeptiert wurde. Die Vpn beschrieben das Signal als aufdringlich und äußerten das Gefühl des Kontrollverlusts. Die beste subjektive Bewertung erhielten die weniger aufdringlichen Lenkrad- und Sitzvibrationen.

3.1.3. Haptische Ausweichhinweise in der Lenkung

Mit Hilfe von Umfeldsensorik erkennen Frontalkollisionswarnsysteme (FCW(S): *Forward Collision Warning (System)*, z. B. [Ben08], [BSB07], [Eid04]) drohende Kollisionen im Bereich der Fahrzeugfront, woraufhin der Fahrer auf das Einleiten einer Brems- oder Ausweichreaktion hingewiesen wird. Dieses FAS soll zu einer Reduktion der hohen Zahl an Kollisionen und Auffahrunfällen im Längsverkehr führen ([KS09], vgl. Abb. 3.4).

Eine Ausweichempfehlung sollte dann in Betracht gezogen werden, „[...] wenn die Situation nicht mehr durch reines Bremsen kollisionsfrei gelöst werden kann und beim Ausweichmanöver geringere Unfallfolgen entstehen als ohne einen Ausweicheingriff“ ([WHU⁺10], S. 249). In einer Fahrsimulatorstudie stellt Apel in einer Kollisionssituation, die durch

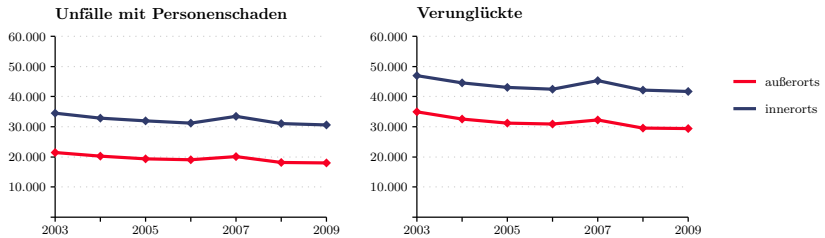


Abb. 3.4.: Statistiken zur Unfallart „Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet“: Anzahl der Unfälle mit Personenschaden (*links*) sowie Anzahl der Verunglückten (*rechts*) in den Jahren 2003 bis 2009 (Quelle: Statistisches Bundesamt).

eine von der Ladefläche eines vorausfahrenden Lkw fallende Kiste ausgelöst wird, eine Tendenz zu Bremsreaktionen¹³ der Fahrer fest ([Ape98]). Auch Kleen & Schmidt zufolge reagieren Fahrzeugführer bei vermeidbaren Kollisionen im ungewarnten Fall häufig ausschließlich mit Bremsreaktionen, was zwar die Stärke der Kollision vermindern kann, zumeist aber nicht vollständig deeskalierend wirkt ([KS09]).

In [KS09] konnten die Autoren eine signifikante Erhöhung von Lenkreaktionen sowie eine signifikante Reduktion der Unfallzahlen beobachten, wenn Ausweichempfehlungen haptisch in der Lenkung in Form von Lenkmomenten gegeben wurden. Weiterhin konnte ein Nichtbeachten unangebrachter Ausweichempfehlungen bei Gegenverkehr festgestellt werden, woraus die Autoren auf die Kontrollierbarkeit des haptischen Signals schließen. Bender provoziert eine Ausweichsituation durch ein von der rechten Seite entfaltendes Hindernis ([Ben08]). Während automatische Bremseingriffe des Fahrzeugs in dieser Situation überwiegend ein Bremsen der Vpn bewirken, reagieren diese auf automatische Lenkeingriffe überwiegend mit Lenken.

¹³Von 32 Vpn reagieren 3 mit einer reinen Lenkreaktion, 6 mit einer Bremsreaktion, 22 mit einer kombinierten Brems- und Lenkreaktion und 1 gar nicht. Bei den 22 kombinierten Brems-/Lenkreaktionen erfolgt der Bremseneingriff in 20 Fällen vor der Lenkreaktion.

Sowohl Spurverlassenswarnsignale als auch Ausweichhinweise zielen auf eine Initiierung einer Fahrerreaktion bzgl. der Fahrzeugquerführung ab. Damit unterscheiden sich diese Systeme von den unter 3.1.4 angeführten Anzeigen bzgl. der Fahrzeugquerführung. Dennoch bestehen beträchtliche Unterschiede in den Anwendungen LDW und FCW. Während Spurverlassenswarnsignale den Fahrer zurück auf die durch den Spurverlauf vorgegebene Trajektorie zu führen versuchen, sollen Fahrer durch Ausweichsignale auf eine neue (Ausweich-)Trajektorie geführt werden. Ein weiterer Unterschied ist in der Zeitreserve des Fahrers zu finden, der in der Kollisionssituation mitunter deutlich schneller reagieren muss als in einer drohenden Spurverlassenssituation.

3.1.4. Weitere Einsatzgebiete

Weitere Anzeigen bzgl. der Fahrzeugquerführung

Systeme, die eine Fahrerreaktion zu initiieren versuchen (z. B. LDWS oder FCWS) sind von solche Systemen zu unterscheiden, die eine vom Fahrer initiierte Aktion unterbinden wollen. Dazu zählen s. g. Spurwechselassistenzsysteme (LCA(S): *Lane Change Assistance (System)*), z. B. [GST⁺08], [JSWY07]), welche den Fahrer warnen, wenn bei einem intendierten Spurwechsel Gefahr droht. Warnereignisse ergeben sich bspw. dann, wenn sich ein Fahrzeug auf der Zielspur im Toten Winkel des eigenen Fahrzeugs befindet (BSD: *Blind Spot Detection*), sowie bei schnell herannahenden oder langsam vorausfahrenden Fahrzeugen auf der Zielspur. Dabei sollte vermieden werden, eine Spurverlassenswarnung und eine Spurwechselwarnung durch identische (haptische) Signale zu realisieren. Hierbei wird die Gefahr gesehen, dass eine Warnung bei einem intendierten gefährlichen Spurwechsel und einem damit verbundenen gewollten Spurverlassen als Fehlwarnung des LDWS interpretiert wird und in der Folge keine Beachtung findet.

Umfangreiche Studien zur haptischen Signalisierung einer drohenden Gefahr beim Spurwechsel wurden von Schumann und Kollegen durchgeführt ([SFW91], [SN92], [Sch93], [SGFW93]). In verschiedenen expe-

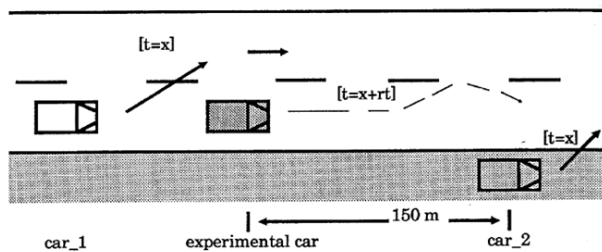


Abb. 3.5.: Spurwechselassistentensysteme:

Erzeugung einer Spurwechselabsicht in einem Fahrversuch durch ein auf die Spur einfahrendes Fahrzeug (car_2), der durch ein von hinten beschleunigendes und ausscherendes Fahrzeug (car_1) abgebrochen werden muss (entnommen aus [Sch93]).

rimentellen Umgebungen wurden hierzu u. a. unterschiedliche haptische Signale in der Lenkung¹⁴ eingesetzt. Im Realfahrzeug wurde eine Spurwechselabsicht durch ein vom Seitenstreifen in die Spur einfahrendes Fahrzeug erzeugt. Ein eingeleiteter Spurwechsel sollte durch ein heranahendes Folgefahrzeug wieder abgebrochen werden (Abb. 3.5). Aufgrund der hohen Komplexität des Fahrmanövers und der geringen Automatisierungsmöglichkeit konnten lediglich 21 auswertbare Datensätze aufgezeichnet werden, in denen die Fahrer in 11 Fällen akustisch und in 10 Fällen haptisch¹⁵ gewarnt wurden. Von letzteren brachen 4 das Manöver ab, während lediglich 2 der 11 akustisch gewarnten Fahrer das Manöver abbrachen. Die Autoren erkennen hieraus einen tendenziell höheren objektiven Nutzen des haptischen Signals gegenüber der akustischen Warnung ([SN92]). Subjektiv präferierten die Vpn hingegen das angenehmere akustische Signal ([Sch93]).

Im Gegensatz zu zeitlich begrenzt aktiven Systemen wie LDWS, FCWS und LCAS unterstützen Spurhalte- bzw. Spurführungsassistentensysteme (LKS: *Lane Keeping Support* bzw. LKA(S): *Lane Keeping Assistance*

¹⁴Lenkradrütteln sowie gerichtetes Lenkmoment.

¹⁵Lenkradrütteln mit 7 Hz, $\pm 1,5$ Nm, 0, 7 s

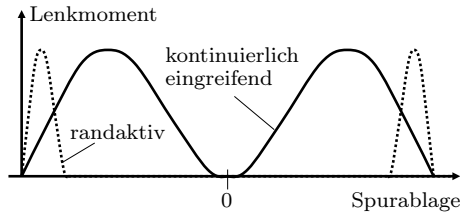


Abb. 3.6.: Haptische Spurführungsassistenz:

Zwei Ausprägungen einer Querunterstützung: kontinuierlich eingreifendes und randaktives System (mit Änderungen entnommen aus [Mar01]).

(System), z. B. [BSB07], [Gay05], [WBR05], [WBR06]) den Fahrer kontinuierlich. Während ein LDWS nach der Definition in Abschnitt 2.1 ein warnendes System darstellt, sind LKAS assistierende Systeme, die den Fahrer durch aktive Eingriffe in die Lenkung über das Warnen hinaus bei korrektiven Bewegungen unterstützen.

Marstaller verdeutlicht diese Differenzierung, indem er u. a. zwei Ausprägungen einer Querunterstützung in Form eines kontinuierlich sowie eines randaktiv über Lenkmomente eingreifenden Systems untersucht ([Mar01], s. Abb. 3.6, s. auch [BK01], [WBR06]). Er stellt fest, dass bei den untersuchten Ausprägungen das kontinuierlich eingreifende System sowohl objektiv als auch subjektiv deutlich schlechter abschneidet als das randaktive System. Hauptkritik der Vpn beim kontinuierlich wirkenden System ist insbesondere der empfundene Kontrollverlust, der durch „das Gefühl, das Fahrzeug nicht alleine zu fahren“ artikuliert wird ([Mar01], S. 304). Es ist jedoch nicht zulässig, die von Marstaller festgestellte geringe Akzeptanz des von ihm untersuchten kontinuierlich eingreifenden Systems zu verallgemeinern. So ist denkbar, dass die Akzeptanz eines solchen Systems mit dem Unterstützungsbedarf zunimmt, so dass bspw. in Baustellenbereichen eine kontinuierliche Führung nicht nur akzeptiert sondern explizit gewünscht werden könnte.

Weiterhin können Navigationssysteme dem Fahrer die Richtung (sowie ggf. den Zeitpunkt) einer Kursänderung haptisch am Lenkrad signali-

sieren. Wenngleich das Übermitteln von Orientierungs- und Navigationsinformation die primäre Anwendung s. g. taktiler Displays darstellt (vgl. Abschnitt 2.3) sind nur wenige Ansätze bekannt, die für diesen Zweck eine haptische Anregung am Lenkrad vorsehen. Haptische Wegleitanzeigen am Lenkrad werden z. B. in [Bou85] in Form von gerichteten Lenkmomenten und umlaufenden Wanderwellen vorgeschlagen (vgl. Abschnitt 3.3). Weiterhin untersuchen Kern und Kollegen die Übermittlung von Navigationsinformationen über ortsspezifische Lenkradvibrationen ([KMH⁺09], s. auch 3.3.1).

Anzeigen bzgl. der Fahrzeuglängsführung

Die Patentschrift DE 3822193 A1 schlägt vor, über Lenkradvibrationen Abstandswarnungen zur Unterstützung der Längsregelung bei Kolonnenfahrten zu übermitteln. Als weitere Anwendung wird die Unterstützung bei Einparkvorgängen erwähnt. In der Patentschrift DE 19912169 A1 ist vorgesehen, Fahrern das Überschreiten einer Maximalgeschwindigkeit bzw. Maximaldrehzahl über Lenkradvibrationen haptisch rückzumelden. Beck und Kollegen schlagen vor, den Fahrer bei Geschwindigkeiten über bzw. unter einer wählbaren Schwelle über Vibrationen an Sensortasten im Lenkrad zu informieren ([BBL⁺86]). Weiterhin werden von Förster Lenkradvibrationen zur Anzeige einer kritischen Kurvengrenzgeschwindigkeit, sowie ab einer bestimmten Geschwindigkeit einsetzende und mit der Geschwindigkeit stärker werdende Lenkradvibrationen zur allgemeinen Aufmerksamkeitserhöhung vorgeschlagen ([Foe91]). Nach Einschätzung Buschardts darf die Akzeptanz eines solchen Systems allerdings angezweifelt werden ([Bus03]). Mit Bezug auf Förster erfolgt in [Bie98] der Versuch, den Fahrer mit einem Lenkradrüttelsignal auf eine zu hohe Kurveneingangsgeschwindigkeit hinzuweisen. Dieses Signal wird von den Fahrern zwar als auffällig aber als wenig eindeutig bewertet, und führt in der Folge nicht zu der gewünschten Geschwindigkeitsreduktion. Insgesamt fällt die Akzeptanz des Signals gering aus, was allerdings auch auf den subjektiv als ungeeignet empfundenen Warnzeitpunkt zurückgeführt werden kann.

Anzeigen von Fahrzeugzuständen und Fahrerfehlbedienungen

Patentschrift DE 34029657 A1 schützt die Applikation von Lenkradvibrationen zur Signalisierung einer nicht deaktivierten Fahrtrichtungswechselanzeige, sowie zur Meldung von Störungen notwendiger Betriebssysteme, wie bspw. Ölmangel. Weiterhin wird vorgeschlagen, Rückmeldungen bei fast leerem Tank oder stark abfallendem Reifendruck durch Lenkradvibrationen zu geben (Patentschrift DE 19912169 A1). Nach derzeitigem Kenntnisstand scheint die intuitive Interpretierbarkeit einer derartigen Anzeige nicht gegeben zu sein, so dass die haptische Anzeige immer durch zusätzliche visuelle Anzeigen unterstützt werden muss und dann primär aufmerksamkeitslenkend wirkt.

Sonstige Anzeigen zur Fahrerbeeinflussung

Ein „Vibrations-Drehmoment“ kann bei unaufmerksamen oder schläfrigen Fahrern eine Erhöhung der Aufmerksamkeit bewirken, wie in Patentschrift DE 19702383 A1 vorgeschlagen wird. In [DKB09] wird Lenkradvibrationen als taktile Rückmeldung eines Müdigkeitserkennungssystems ein potentieller Nutzen zugesprochen. Eine Anwendung von Lenkradvibrationen zur Anregung der Durchblutung und zum Lösen von Verspannungen insbesondere bei längeren Fahrten wird in Patentschrift DE 34029657 A1 vorgestellt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine studentische Fallarbeit betreut, welche den Einfluss von Lenkradvibrationen auf emotionale Fahrerzustände nachweisen konnte¹⁶. Wegen der Relevanz der Emotion „Angst“ im Fahrzeugkontext wurde die Beeinflussung von Angst durch unterschiedliche Vibrationsreize¹⁷ getestet, die über einen auf ein Lenkrad montierten Körperschallerzeuger generiert wurden (vgl. Abschnitt 3.4.2,

¹⁶LEUGER, J.; MANDEL, N.; KRANZ, J.: Untersuchung zum Einfluss von Lenkradvibrationen auf das Angstempfinden. *Fallarbeit Verkehrs- und Ingenieurpsychologie*, Universität Tübingen, 2010.

¹⁷40 Hz mit 0,14 m/s² r.m.s., 40 Hz mit 1,38 m/s² r.m.s., 100 Hz mit 1,03 m/s² r.m.s.

insbesondere Abb. 3.17). Hierzu wurde Angst mit Bildern des *International Affective Picture Systems* (IAPS, [LBC97]) sowohl mit als auch ohne zeitgleiche Lenkradvibration induziert. Im Anschluss an jedes Bild sollten die Vpn ihr Gefühl bei der Betrachtung des Bildes auf der Valenz- und der Aktivierungsskala des *Self-Assessment Manikin* (SAM, [Lan80], [BL94]) einordnen. Es konnte gezeigt werden, dass die Gefühlsempfindung negativer und mit einer höheren Aktivierung beurteilt wird, wenn gleichzeitig zur Bilddarbietung das Lenkrad vibriert, wobei der Einfluss je nach Vibrationsstimulus unterschiedlich stark ausfiel.

3.1.5. Zusammenfassung: haptische Lenkradsignale

Sieht man von prototypischen Forschungsaufbauten ab, so werden synthetische haptische Signale in der Lenkung zweckmäßig durch überlagerte Lenkmomente (propriozeptiv) oder durch in das Lenkrad integrierte Unwuchtmotoren (taktil) erzeugt. Bestehende Arbeiten fokussieren insbesondere auf die Anregung über Lenkmomente und weisen dabei einen geringen Konsens in der Signalforn, -parametrierung und -bezeichnung auf, was das Ableiten allgemeingültiger Erkenntnisse zu Eigenschaften und Wirkungen haptischer Signale erschwert. Aus diesem Grund müssen auch die bisherigen Erkenntnisse auf dem vermeintlich primären Einsatzgebiet haptischer Signale in der Lenkung, der Spurverlassenswarnung, kritisch hinterfragt werden. Für die vorliegende Arbeit werden aus diesen Erkenntnissen Hypothesen abgeleitet, die es zu Überprüfen gilt (vgl. Kapitel 4). In den folgenden Abschnitten werden hierzu zunächst physiologische Grundlagen der haptischen Wahrnehmung resümiert, aus denen Wirkungen haptischer Signale auf den Fahrer abgeleitet werden. Aufgrund der Fokussierung der Arbeit wird die Physiologie der Taktilität dabei ausführlicher betrachtet.

3.2. Physiologische Grundlagen

3.2.1. Physiologie der Taktilität

Die Haut als Träger der für Taktilität sowie Temperatur- und Schmerzwahrnehmung zuständigen Sensoren bildet mit einer Fläche von etwa $1,8 \text{ m}^2$ bei einem durchschnittlichen erwachsenen Mann ([SC86]) das flächenmäßig größte Sinnesorgan des Menschen ([Zim05]). Es wird zwischen der behaarten und der unbehaarten Haut unterschieden, wobei letztere Fußsohlen und Handinnenflächen bedeckt. Beinahe überall sonst ist die Hautoberfläche behaart. Mit ca. 17.000 mechanorezeptiven Nervenfasern zählt die Handinnenfläche zu den am stärksten innervierten Hautregionen des menschlichen Körpers ([Sch09]). Der Mensch ist hier in der Lage, bereits Druckreize von $10 \text{ }\mu\text{N}$ bzw. Vibrationsreize mit einer Eindringtiefe von $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ (bei 100 Hz) wahrzunehmen ([Zim05]). Die simultane Raumschwelle¹⁸ ist an der Handinnenfläche sowie den unteren Fingergliedern sehr gering und nimmt mit ca. 3 mm an den Fingerspitzen einen Minimalwert ein ([Wei68]). Auch konnte bereits 1935 in Experimenten von Setzpfand & Wilska gezeigt werden, dass die Sensitivität bzgl. Vibrationsreizen in der Handinnenfläche maximal ist ([Wil54]).

Frühe Untersuchungen in [Ver63] zur subjektiven Vibrationswahrnehmung motivierten das ursprüngliche Zwei-Kanal Modell der taktilen Perzeption ([JL06]). Anhand der resultierenden Wahrnehmungskurven wurde postuliert, dass ein Kanal sowohl die Fähigkeit der zeitlichen als auch räumlichen Summation¹⁹ aufweist, während beides beim anderen Kanal nicht vorliegt. In weiterführenden Untersuchungen wurden diese Befunde bestätigt und die Pacini-Körperchen als physiologisches Korrelat für den summierenden Kanal identifiziert. Dieser wurde als P-Kanal (*Pacinian*) bezeichnet, während für den anderen Kanal die Bezeichnung

¹⁸auch Zweipunktschwelle: minimale räumliche Distanz zweier Stimulationspunkte, bei der diese noch getrennt wahrgenommen werden.

¹⁹Unter räumlicher Summation versteht man die Summation synaptischer Ströme und Potentiale mehrerer Synapsen an einer Nervenzelle. Die zeitliche Summation bezeichnet die Summation von in geringem zeitlichem Abstand aufeinanderfolgenden synaptischen Strömen und Potentialen einer Synapse ([LL07], [DH05]).

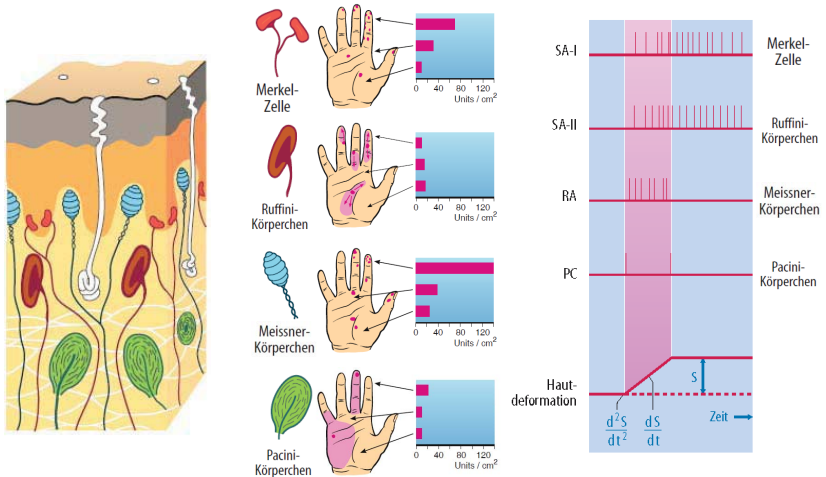


Abb. 3.7.: Mechanosensoren der unbehaarten Haut:

Links: Lage der Mechanosensoren in der Haut (entnommen aus [Zim05]). *Mitte:* Rezeptive Felder und Innervationsdichte der Sensoren (mit Änderungen entnommen aus [Han05b]). *Rechts:* Schematische Darstellung des Entladungsverhaltens bei rampenförmiger Hautdeformation (entnommen aus [Zim05]).

NP (*Non-Pacinian*) eingeführt wurde ([Ver85]). Mit Hilfe psychophysischer Methoden konnte ein mittlerweile etabliertes Vier-Kanal Modell der Taktilität verifiziert werden, welches den ursprünglich einfachen NP-Kanal in die drei Kanäle NP_I²⁰ bis NP_{III} unterteilt ([BGVC88]).

Das Vier-Kanal Modell korreliert mit den vier auf physiologischer Ebene vorhandenen Typen von Afferenzen (Merkel-Zellen, Ruffini-, Meissner- und Pacini-Körperchen, vgl. Abb. 3.7), die jeweils einem Kanal zugeordnet werden (z. B. [Mor03b], [MG09], [MB07]). Diese unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich der Größe ihres Reizungsbereichs, welche primär aus der Tiefenlage in der Haut resultiert, sowie Umfang und Ge-

²⁰zu Gunsten einer besseren Lesbarkeit wird anstatt der üblichen Schreibweise „NP I, NP II, ...“ die Indexschreibweise „NP_I, NP_{II}, ...“ verwendet. Ebenso wird bei der Unterteilung der SA- und RA-Sensoren verfahren.

schwindigkeit der Adaptation ([Thu01]). Letzteres ist Basis für die Klassifikation in schnell adaptierende RA- (*rapidly adapting*²¹) und langsam adaptierende SA-Sensoren (*slowly adapting*) ([SC86]). Diese werden wiederum unterteilt in SA_I- und SA_{II}- sowie RA_I- und RA_{II}-Sensoren. Gängiger ist allerdings die Bezeichnung PC-Sensoren für die RA_{II}-Sensoren, da diese den Pacini-Körperchen entsprechen. RA_I-Sensoren werden dann vereinfacht nur als RA-Sensoren bezeichnet ([Han05b], [Zim05]).

Die oberflächlich gelegenen Merkel-Zellen und Meissner-Körperchen weisen wesentlich kleinere und deutlich schärfer begrenzte receptive Felder auf als die in den tieferen Hautschichten gelegenen Ruffini- und Pacini-Körperchen ([LL07], [Wil06], vgl. Abb. 3.7). Durch die hohe Innervationsdichte an den Fingerspitzen liegt das räumliche Auflösungsvermögen der oberflächlichen Sensoren bei 0,5-5 mm, bei Ruffini- und Pacini-Körperchen beträgt dies 10-20 mm ([Wil06]). Tabelle 3.1 fasst ausgewählte Eigenschaften der Mechanosensoren zusammen.

Die Zuordnung der Afferenzen zu sensorischen Qualitäten erfolgt auf Basis des Entladungsverhaltens bei kontrollierter mechanischer Reizung der Haut ([Cam93], [Hen85]). Der Reizverlauf enthält Phasen konstanter Hautdeformation sowie Phasen konstanter Deformationsgeschwindigkeit

²¹gelegentlich auch FA (*fast adapting*), z. B. in [JL06], [LL07] sowie [MG05].

Tab. 3.1.: Ausgewählte Eigenschaften der Mechanosensoren

	Meissner Körp.	Merkel- Zelle	Pacini Körp.	Ruffini Körp.
funktionale Klassifik.	RA/RA _I	SA _I	PC/RA _{II}	SA _{II}
Kanal	NP _I	NP _{III}	P	NP _{II}
sensorische Qualität	Berührung	Druck	Vibration	?
Größe receptive Felder	13 mm ²	11 mm ²	101 mm ²	59 mm ²
Auflösungsvermögen	3-5 mm	0,5 mm	20 mm	10 mm
zeitliche Summation	nein	nein	ja	ja
räumliche Summation	ja	nein	ja	?
Temperaturabhängig	nein	ja	sehr	ja

(Abb. 3.7 *rechts*). Die an den Übergängen auftretenden Beschleunigungen werden durch Pacini-Körperchen signalisiert. Während Meissner-Körperchen Deformationsänderungen anzeigen, reagieren SA-Sensoren auch auf konstante Deformationen, wobei SA_I-Sensoren eine stärkere dynamische Komponente aufweisen ([DS99]). Anhand der Entladungsmuster werden die SA_I-Sensoren als zuständig für die Wahrnehmung von *Druck* identifiziert. Die sensorischen Qualitäten *Berührung* und *Vibration* werden den RA-Sensoren zugeschrieben. Über die Rolle der SA_{II}-Sensoren herrscht Uneinigkeit (z. B. [LL07], [Han05b]).

Diese Zuordnung ist eine vereinfachte Modellierung, die reale Überlappungen der Sensitivitäten nicht berücksichtigt. Wie stark bspw. ein Vibrationsreiz verschiedene Mechanosensoren erregt, hängt primär von dessen Frequenz ab. Eine strikte Abgrenzung der Frequenzbereiche der Sensoren ist aufgrund der schwierigen Isolierung sowie interindividueller Differenzen nicht möglich ([Man05]). Entsprechend schwanken Angaben in der Literatur. Für PC-Sensoren wird bspw. ein Frequenzbereich von 40-400 Hz ([Man05]), 40-800 Hz ([BGVC88], [MB07]) bzw. 70-1000 Hz ([Wil06]) angegeben. Nach heutiger Auffassung sind RA_{II}-Sensoren hauptsächlich für die Vibrationswahrnehmung über 40 Hz verantwortlich (mit einem starken Rückgang der Sensitivität ab 700 Hz, [DRS⁺01]), während die Wahrnehmung von Vibrationen unter 40 Hz primär durch RA_I-Sensoren ermöglicht wird ([Gri90]).

3.2.2. Physiologie der Propriozeption

Propriozeption umfasst die Qualitäten *Stellungssinn* (Wahrnehmung der Stellung der Gelenke), *Bewegungssinn* (Wahrnehmung der Bewegung der Gelenke) und *Kraftsinn* (Wahrnehmung des Ausmaßes an Muskelkraft, die zur Aufrechterhaltung einer Gelenkstellung oder zur Bewegungsdurchführung notwendig ist). Es wirken eine Vielzahl von Sensoren aus Muskeln, Gelenken und Sehnen zusammen, weshalb von polysensorischer Integration gesprochen wird ([Zim05]).

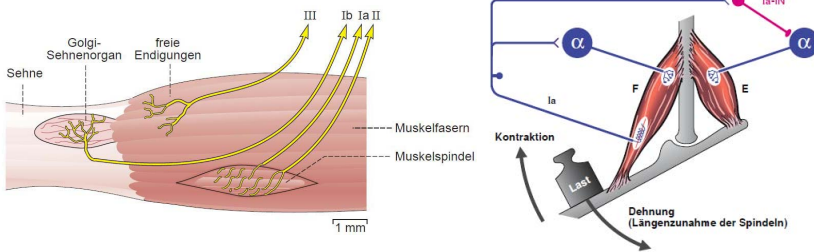


Abb. 3.8.: Propriozeption und Muskeldehnungsreflex:

Links: Muskelspindeln im Inneren des Muskels messen Muskel­längen, Golgi-Sehnenorgane messen Muskelkräfte am Übergang zwischen Muskelfaser und Sehne (entnommen aus [DS99]).

Rechts: Längenstabilisierender Muskeldehnungsreflex (schematische Darstellung, entnommen aus [IKB06]).

Golgi-Sehnenorgane (auch Golgi-Sensoren) messen die aktiv entwickelte Muskelspannung ([Wie05]). Sie liegen seriell zum Arbeitsmuskel am Übergang zwischen Muskelfaser und Sehne (s. Abb. 3.8 *links*). Ihr Sensorverhalten ist proportional-differentiell (PD), wobei die proportionale Komponente stärker ausgeprägt ist ([IKB06]). Der durch sie ausgelöste Reflex wirkt einer übersteigerten Muskelspannung entgegen, die ansonsten zu Muskel- oder Sehnenrissen führen könnte ([LL07]).

Die Erfassung der Gelenkstellung erfolgt über Muskelspindeln und Mechanosensoren in den Gelenkkapseln, wobei letztere eine nachgeordnete Rolle spielen ([SLT05]). Muskelspindeln sind Rezeptoren im Inneren der eigentlichen (extrafusalen) Arbeitsmuskelfaser, die bei Dehnung des Muskels mitgedehnt und damit erregt werden ([LL07]). Sie liegen also nicht wie die Golgi-Sensoren seriell sondern parallel zum jeweiligen Arbeitsmuskel. Muskelspindeln enthalten spezialisierte intrafusale Muskelfasern, wobei zwischen Kernketten- und Kernsackfasern unterschieden wird ([Wie05]). Die Kernkettenfasern erfassen vornehmlich die Länge (statisches Verhalten), die Kernsackfasern die Längenänderung (dynamisches Verhalten) des Muskels, so dass sich in der Gesamtbetrachtung ebenfalls ein PD-Sensorverhalten ergibt ([IKB06]).

3.2.3. Muskeldehnungsreflex und Co-Kontraktion

Eine Dehnung der intrafusalen Muskelfasern führt zur Innervation der extrafusalen Muskulatur über α -Motoneuronen. Dies bedeutet, dass bei erzwungener Dehnung eines Muskels die Kontraktion dieses Muskels ausgelöst wird, so dass dieser wieder auf seine ursprüngliche Länge zurückgeführt wird. Dieser zur Lagestabilisierung dienende Regelkreis wird als Muskeldehnungsreflex bezeichnet ([Wie05]). Mit einer Latenzzeit von 30 ms handelt es sich hierbei um einen Regelkreis mit kurzem Feedback ([LL07]). Der „Patellarsehnenreflex“, bei dem eine Kontraktion des Oberschenkelmuskels (*M. (Musculus) quadriceps femoris*) durch einen Schlag mit dem Reflexhammer auf die unterhalb der Kniescheibe befindliche Patellarsehne ausgelöst wird, ist ein Beispiel für den Muskeldehnungsreflex ([IKB06]).

Die Länge der Muskelspindeln, und damit deren Empfindlichkeit, kann über γ -Motoneuronen angepasst werden. Bei langsamen Zielbewegungen, bei denen eine Dehnung des Muskels gewünscht ist, werden diese γ -Motoneuronen gemeinsam mit den α -Motoneuronen innerviert, so dass der entgegenwirkende Muskeldehnungsreflex verhindert wird ([LL07]). Bei einer von außen erzwungenen Längenänderung des Muskels hat dieser jedoch die Tendenz, seine ursprüngliche Länge wieder einzustellen.

Das Konzept „ReflektAS“ ([KEE07], [KELE08], [KEE09]) macht sich das Phänomen reflexiver (Lenk-)Reaktionen zunutze. Durch bestimmte Lenkgegenrücke, die bspw. im Falle der Spurverlassenswarnung in Richtung Spurrand gerichtet sind, werden Lenkreflexe in die entgegengesetzte Richtung ausgelöst. Kritisch anzumerken ist hierbei die Tatsache, dass Reaktionen auf Basis eines Reflexes und nicht aufgrund einer bewussten Handlungsentscheidung des Fahrers ausgeführt werden. Nach Aussage von Kullack und Kollegen ist dieses Konzept „[...] speziell für kritische Situationen entwickelt“ ([KEE09], S. 209). Die tatsächliche Anwendung im Fahrzeug erscheint nach Meinung Schmidts allerdings insbesondere deshalb noch nicht absehbar, weil die Auswirkungen solcher „hochgradig verknüpfter Reiz-Reaktions-Mechanismen“ aktuell nur sehr schwer abgeschätzt werden können ([Sch09], S. 110).

In Abb. 3.8 (*rechts*) ist das Ellenbogengelenk schematisch dargestellt. Der Muskeldehnungsreflex wirkt hier nicht nur auf den gedehnten Arbeitsmuskel (Flexormuskel F) sondern auch auf den Extensormuskel (E), in welchem durch inhibitorische Interneurone (Ia-IN) eine reziproke Hemmung ausgelöst wird ([IKB06]). Bei Co-Kontraktion, also gleichzeitiger Anspannung von Flexor und Extensor (Agonist und Antagonist) nimmt die Steifigkeit des Gelenks zu, so dass passive Bewegungen von Muskeln und Gelenken verhindert werden ([LL07]). Pick & Cole modellieren das Lenkrad-Arm-System als Feder-Masse-Dämpfer-System. In Laboruntersuchungen konnten sie zeigen, dass bei ruckartiger Lenkmomentenanregung durch Co-Kontraktion der Muskeln die Steifigkeit des Lenkrad-Arm-Systems zunimmt ([Col08], [PC07], [PC08]). Dadurch wird die Armdynamik des Fahrers eingeschränkt, was im Sinne einer angestrebten schnellen Fahrerreaktion hinderlich sein kann.

3.2.4. Motorik des Lenkens

Zur Identifikation der am Lenkvorgang beteiligten Muskulatur modellieren Pick & Cole das menschliche Lenkrad-Arm-System ([PC06], s. Abb. 3.9 *links*). Demnach werden tangentialen Lenkkräfte F_{yr} , die zur Drehung des Lenkrads führen, durch Anhebung bzw. Absenkung von Arm und Schulter erzeugt. Die dabei potentiell beteiligten Muskeln sind in Abb. 3.9 (*rechts*) dargestellt.

Die von Pick & Cole durchgeführten elektromyographischen Messungen am rechten Arm während der Durchführung von Lenkbewegung bei einarmiger Lenkradhaltung in der 3-Uhr-Position ergaben, dass bei der Anhebung insbesondere der vordere und mittlere Schultermuskel *M. deltoideus* involviert sind. Bei der Absenkung sind insbesondere der Brustbein-Rippen Teil des großen Brustmuskels *M. pectoralis major* und der lange Kopf des *M. triceps brachii* beteiligt. Nach Angabe der Autoren sind diese Ergebnisse anatomisch plausibel und konsistent mit den in [JJ75] beschriebenen Resultaten.

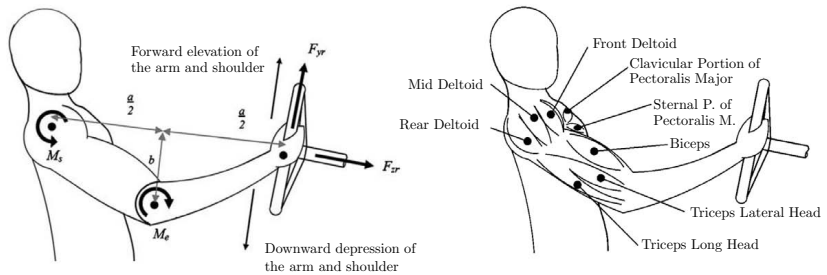


Abb. 3.9.: Motorik des Lenkens:

Links: Modellierung der Gelenkmomente und Lenkkräfte bei Lenkvorgängen. *Rechts:* Potentiell am Lenkvorgang beteiligte Muskeln (mit Änderungen entnommen aus [PC06]).

3.2.5. Zusammenfassung: physiologische Grundlagen

Es wird festgestellt, dass bei propriozeptiven Signalen aufgrund physiologischer Gegebenheiten deutlich komplexere Zusammenhänge zwischen der mechanischen Anregung und der Fahrerreaktion bestehen als bei taktiler Reizung. Bei der Auslegung propriozeptiver Signale in Form synthetischer Lenkmomente ist die Möglichkeit bzw. Gefahr der Initiierung reflexiver Lenkreaktionen ebenso zu beachten, wie Aspekte der Co-Kontraktion der Armmuskeln und deren Auswirkung auf die dynamische Leistung des Fahrers. Bei taktiler Reizung sind Reflexreaktionen oder muskelkontrahierende Rückwirkungen nicht möglich.

Zu beachten ist weiterhin, dass für die Ausführung von Hub- bzw. Senkbewegungen der Arme unterschiedliche Muskeln innerviert werden. Dies hat bspw. zur Folge, dass bei einarmigen Lenkvorgängen mit seitlicher Lenkradhaltung rein aus motorischer Sicht Unterschiede zwischen einer Drehung im Uhrzeigersinn und einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn bestehen, die zu Leistungsvorteilen bei einer der beiden Handlungsalternativen führen können.

3.3. Lenkradvibrationen mit Richtungsinformation

Nachdem aus den Erkenntnissen der in Abschnitt 3.1.2 aufgeführten Studien hypothetisiert wird, dass directionale Spurverlassenswarnsignale den entsprechenden nondirektionalen Ausprägungen subjektiv vorgezogen werden, werden Möglichkeiten zur Anreicherung einer taktilen, durch Unwuchtmotoren erzeugten Lenkradvibration mit Richtungsinformation untersucht. Nach Einschätzung Gaykos ist es „[...] bei einer Vibration im Lenkrad nur schwer möglich, dem Fahrer mitzuteilen, auf welcher Seite der Fahrstreifen verlassen wird“ ([Gay09], S. 34). Die Tatsache, dass „mit dieser Warnung in der Regel keine Richtungsinformation im Sinne einer Handlungsanweisung an den Fahrer übermittelt wird“, wird von Buschardt als problematisch angesehen ([Bus03], S. 50).

Van Erp & van Veen erkennen zwei prinzipielle Möglichkeiten zur Übermittlung einer Richtungsinformation über Vibrationen im Fahrersitz ([EV01]). Zum einen ist dies über den *Ort* einer Vibration mit den beiden Ausprägungen „links“ und „rechts“ möglich. Zum anderen wird die Richtungsinformation über die *Bewegung* der Vibration „nach links“ bzw. „nach rechts“ codiert. Diese Überlegungen lassen sich auf Lenkradvibrationen übertragen, so dass Richtungsinformationen entweder über einseitige Lenkradvibrationen (links oder rechts) oder durch im Lenkradring umlaufende Vibrationen (im bzw. gegen den Uhrzeigersinn (UZS)) übermittelt werden können. Eine dritte und in der Literatur bislang nicht erwähnte Möglichkeit besteht darin, taktile Lenkradvibrationen durch ein richtungsgebendes Lenkmoment zu überlagern.

3.3.1. Einseitige Lenkradvibrationen

Dass rotatorische Lenkbewegungen (im bzw. gegen den UZS) durch einseitige laterale Lenkradvibrationen (links bzw. rechts) codiert werden können ist möglich, da Fahrer Rotationsbewegungen mit lateralen Eigenschaften belegen. So wird bspw. ein Drehen des Lenkrads im UZS als Lenken „nach rechts“ bezeichnet. Nach Proctor & Vu ist dies zum

einen in der Fahrzeugreaktion begründet. So erfordert eine Richtungsänderung nach rechts ein Drehen des Lenkrads im UZS. Zum anderen bewegt sich der dem Sichtfeld des Fahrers nächstgelegene obere Teil des Lenkrads bei einer Drehung im UZS zunächst nach rechts ([PV06]).

Navarro und Kollegen ([NMF⁺08], [EJFN⁺08]) sowie Kern und Kollegen ([KMH⁺09]) versuchen, durch die Verteilung mehrerer Vibrationsaktoren entlang des Lenkradrings einseitige Lenkradvibrationen zu erzeugen. Während die vibrierende Seite im erstgenannten Fall die Richtung eines drohenden Spurverlassens anzeigt und damit ein Weglenken von der Vibration erfordert, übermittelt die Lenkradvibration in [KMH⁺09] Navigationshinweise, in deren Richtung gelenkt werden soll. In beiden Arbeiten wird von einer mangelnden mechanischen Entkopplung des Lenkradaufbaus berichtet²², so dass die einseitig applizierte Lenkradvibration auch auf der gegenüberliegenden Seite spürbar ist und dadurch die differenzierte Bewertung der Richtungsinformation erschwert.

Ganz allgemein können Argumente für eine aversive bzw. für eine lockende Warnung gefunden werden. Bei einer aversiven Warnung zeigt das Signal den Ort der Gefahr an. Es wird vermutet, dass Fahrer dann ihre Aufmerksamkeit schneller auf diese Gefahr richten und eine Handlungsentscheidung ableiten. Insbesondere bei sehr kurzfristigen Warnungen ist jedoch die Information über das „wohin“ zeitlich vordringlicher als die Information „was ist“, so dass eine lockende Warnung zu schnelleren Reaktionen führen sollte (vgl. [Die06]).

Werden durch einseitige Vibrationsreize schnelle Lenkreaktionen angestrebt, so muss das Prinzip der Reiz-Reaktions-Kompatibilität (SRC: *Stimulus-Response Compatibility*, [FS53]) beachtet werden. Das SRC-Prinzip beschäftigt sich mit der Zuordnung (Mapping) zwischen Reizen und Reaktionen und dient der Erklärung, warum bei Wahlreaktionsaufgaben bestimmte Reiz-Reaktions-Zuordnungen als „intuitiver“ empfunden werden und zu besseren Reaktionsleistungen führen ([PWP04]). Der

²²„Almost two-thirds of the participants mentioned difficulties in distinguishing direction and location of the tactile vibration signal, possibly due to the insufficiencies of our current hardware implementation“ ([KMH⁺09], S. 50). „[...] lateralization was not well perceived (felt on both hands)“ ([EJFN⁺08], S. 316).



Abb. 3.10.: Beispiel für räumliche Kompatibilität:

Die Kreise stehen für Stimuli, die Quadrate für Reaktionen.

SRC-Effekt beschreibt derartige mappingsbedingte Leistungsunterschiede, die sich bspw. in schnelleren und fehlerfreieren Reaktionen äußern. Räumliche Kompatibilität liegt demnach dann vor, wenn sich Reiz und Reaktion wie in Abb. 3.10 *links* das gleiche räumliche Merkmal teilen. Ein SRC-Effekt konnte für einseitige akustische Reize und Lenkreaktionen bereits nachgewiesen werden. So beobachtete Guiard schnellere und fehlerfreiere Reaktionen, wenn die Vpn auf einseitige akustische Reize mit einer Lenkreaktion in Richtung des Reizes (ipsilateral) reagieren sollten, als wenn die Reaktion in die entgegengesetzte Richtung (kontralateral) ausfallen sollte ([Gui83]). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Proctor, Wang und Pick ([PWP04], [WPP03a], [WPP03b]).

Der Ansatz der semantischen Anreicherung soll Fahrer zu einer schnellen und adäquaten Reaktion befähigen. Demnach sollte bspw. die Anzeige einer Kollisionsgefahr durch ein Signal erfolgen, welches gleichzeitig Informationen über das Gefahrenobjekt sowie dessen Position transportiert ([Fri09]). Ein Effekt semantischer Anreicherung konnte für akustische Stimuli festgestellt werden. Für die Hälfte der Vpn in der in [WPP03a] beschriebenen Studie wurden einseitige akustische Reize als simple Töne deklariert, die mit ipsi- bzw. kontralateralen Lenkreaktionen quittiert werden sollten. Die andere Hälfte wurde instruiert, dass die akustischen Signale den Ort einer drohenden Gefahr (aversiv) bzw. die sichere Richtung im Sinne einer Gefahrenvermeidung (lockend) anzeigen. Wie auf Basis des SRC-Effekts hypothetisiert, waren ipsilaterale Reaktionen schneller und fehlerfreier als kontralaterale Reaktionen. Durch die semantische Anreicherung konnten die Reaktionszeiten allgemein signifikant verkürzt werden. In einer Folgestudie im Fahrsimulator

([WPPY07]) führte die semantische Anreicherung zu einer Invertierung des SRC-Effekts, so dass kontralaterale Reaktionen durch die semantische Anreicherung schneller und fehlerfreier waren.

Neben der Semantik eines Warnsignals muss dessen Pragmatik beachtet werden (vgl. Abschnitt 6.3.2). Diese aus der Zeichentheorie stammenden Begriffe beschreiben die Beziehung zwischen dem Zeichen und dem Bezeichneten (Semantik) bzw. dem Zeichenbenutzer (Pragmatik, [Mor38]). In einer deutschen Übersetzung werden diese Unterschiede durch die Begriffe „Bedeutung“ (Semantik) und „Bedeutsamkeit“ (Pragmatik) deutlich. Weiterhin kann die Qualität des Warnreizes die Reaktion beeinflussen. So konnten bei warmen und weichen Tönen spontane Zuwendungen der Vpn beobachtet werden, während laute und harte Geräusche zu einer Abwendung führten ([Krü02]). Vergleichbare Einflüsse affektiver Eigenschaften vibrotaktiler Reize sind vorstellbar.

3.3.2. Umlaufende Lenkradvibrationen

Der in [KMH⁺09] eingesetzte Aufbau (vgl. Abschnitt 3.3.1) ermöglicht auch die Erzeugung von Vibrationen, die entlang des Lenkrads umlaufen. Diese Signalform wird von den Autoren jedoch nicht untersucht. Weiterhin wird in [Bus03] ein Hochschulprojekt erwähnt, welches zum Ziel hat, Richtungsinformation über umlaufende Lenkradvibrationen zu übermitteln, wobei keine Versuchsreihen beschrieben werden, die eine fundierte Einschätzung des Signals erlauben würden.

Durch das Muster der zeitlichen Ansteuerung räumlich getrennter Vibrationsaktoren können Bewegungen in eine Richtung vorgegeben werden. Zur Steigerung der räumlichen Auflösung kann das Phänomen der „sensorischen Saltation“ genutzt werden, welches bei zeitlich und räumlich getrennt dargebotenen (Vibrations-)Reizen berücksichtigt werden muss. Dieses von Geldard und Kollegen ([Gel75], [GS72]) beschriebene, auch als „cutaneous rabbit“ (s. Abb. 3.11 *links*) bezeichnete Phänomen, wird umfassend von Stolle ([Sto03]) thematisiert. Der folgende Abschnitt ist inhaltlich der Arbeit von Stolle entnommen.

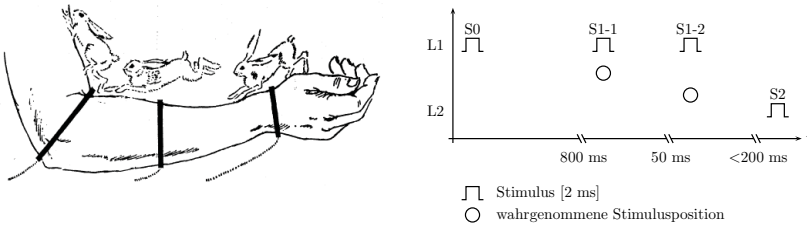


Abb. 3.11.: Sensorische Saltation:

Links: Karikatur der sensorischen Saltation (auch als „cutaneous rabbit“ bezeichnet, entnommen aus [Sto03]). *Rechts:* MR-Paradigma: In Abhängigkeit vom Interstimulusintervall zu S_2 werden die Reize $S1-i$ fehllokalisiert (in Anlehnung an [Sto03]).

Unter bestimmten Umständen werden vibrotaktile Reize in Abhängigkeit vom Interstimulusintervall (ISI) zu einem zeitlich nachfolgenden und räumlich getrennten Stimulus fehllokalisiert. Das Paradigma „multiple rabbit“ (MR-Paradigma) bedarf der Reizung an 2 verschiedenen Reizorten ($L1$ und $L2$) mit mindestens 4 Stimuli. Nach einem Ankündigungsreiz S_0 an $L1$ folgen nach einem längeren ISI von mehr als 500 ms mindestens 2, maximal jedoch 15 Reize $S1-i$ am selben Ort mit jeweils kurzen ISI von 20 bis 50 ms, die durch den räumlich getrennt an $L2$ applizierten Stimulus S_2 angezogen werden, wodurch es in der Folge zu einer Fehllokalisation der Reize $S1-i$ kommt (vgl. Abb. 3.11 *rechts*). Durch gezielte spatiotemporale Reizung können so wandernde Reize mit einer wahrgenommenen räumlichen Auflösung erzeugt werden, welche die durch die Aktoren vorgegebene räumliche Auflösung übersteigt.

Die Paradigmen „reduced rabbit“ und „utterly reduced rabbit“ sind Abwandlungen des MR-Paradigma, bei denen die Anzahl der Stimuli reduziert ist. Bei ersterem folgt auf den Ankündigungsreiz S_0 lediglich ein Stimulus S_1 am selben Reizort $L1$, der vom Reiz S_2 an $L2$ angezogen wird. Letzteres verzichtet zusätzlich auf den Stimulus S_0 . Weiterhin ist das Paradigma „symmetrical rabbit“ bekannt, bei dem ein zusätzlicher Lokalisationsstimulus S_3 zeitlich nach S_2 am Reizort $L2$ appliziert wird. Beim „tibbar“ Paradigma wird schließlich nach dem Reiz S_0 an $L1$ ein

Reiz $S1$ an $L2$ appliziert, auf welchen ein Reiz $S2$ an $L1$ folgt, welcher den Reiz $S1$ anzieht. So kommt es zu einem räumlich umgekehrten Saltationseffekt, was sich in der Bezeichnung „tibbar“ als Umkehrung von „rabbit“ widerspiegelt. In [TP97] wird der Saltationseffekt eingesetzt, um eine taktile Illusion am Rücken der Vpn auszulösen.

Eine weitere taktile Illusion ist der nach von Békésy benannte „Békésy-Effekt“ [Bék67]. Werden zwei Vibrationsreize innerhalb eines Körperareals an getrennten Positionen dargeboten, so werden diese unter gewissen Umständen zu einer gemeinsamen Wahrnehmung integriert. Bei synchroner Darbietung ($ISI = 0$ ms) liegt dann der wahrgenommene Reiz mittig zwischen den beiden Applikationsorten. Bei asynchroner Reizung mit $ISI < 20$ ms wandert der wahrgenommene Reiz sukzessive in Richtung des Ortes, an dem der Reiz zuerst dargeboten wird ([Sto03]).

Eine konkrete Untersuchung umlaufender Lenkradvibrationen wird in [HR10] beschrieben. In einem prototypischen Aufbau werden 32 Vibrationsmotoren äquidistant entlang des Umfangs eines Lenkrads verteilt. Die Vpn, die das lose Lenkrad frei in der Hand halten, sollen auf umlaufende Vibrationen mit einer Lenkraddrehung und auf nondirektionale Vibrationen am gesamten Lenkrad mit einer Bremsreaktion reagieren.

Es werden sowohl die Dauer der Vibration an einzelnen Aktoren (DoS, *Duration of Stimulus*: 150, 300 bzw. 450 ms) als auch temporale und räumliche Darbietungsmuster jeweils dreistufig variiert. Als räumliche Ansteuerungsmodi werden ein nicht-überlappendes, ein überlappendes sowie ein kumulierendes Muster untersucht (s. Abb. 3.12). Als temporales Muster wird ein sukzessives Aktivieren mit $ISI=30$ ms umgesetzt. Weiterhin sollen sensorische Illusionen gemäß dem MR-Paradigma über temporale Muster bzw. durch Variation der Stimulusintensität erzeugt werden. Es werden keine Angaben darüber gemacht, ob die Vpn die sensorischen Illusionen nachempfinden können.

Die mittlere Lenkreaktionszeit (RT) bei der Applikation direktonaler Vibrationsmuster liegt im Experiment bei ca. 2 s. Dabei konnte ein hoch signifikanter Einfluss der Einzelstimulusdauer festgestellt werden (RT=1970 ms bei DoS=150 ms, 2150 ms bei 300 ms sowie 2340 ms

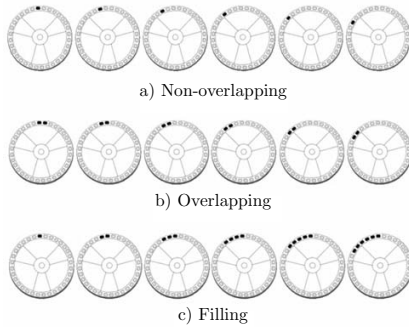


Abb. 3.12: Richtungsinformation in umlaufenden Lenkradvibrationen:

Hwang & Ryu untersuchen die drei räumliche Modi a) bis c) in Kombination mit verschiedenen temporalen Mustern sowie Stimulusdauern zur Übermittlung von Richtungsinformation über umlaufende Lenkradvibrationen (mit Änderungen entnommen aus [HR10]).

bei 450 ms). Bezüglich der spatiotemporalen Ansteuerung konnten die schnellsten Reaktionszeiten bei räumlich überlappender und zeitlich gepulster (Saltation) Ansteuerung festgestellt werden. Die Autoren stellen fest, dass der prototypische Aufbau geeignet zur Übermittlung direktonaler Vibrationen ist, und das Konzept der umlaufenden Lenkradvibration aufgrund der Studienergebnisse weiter verfolgt werden sollte.

Während durch die genannten Paradigmen und Effekte lediglich die Illusion einer wandernden Bewegung hervorgerufen wird, werden in der Literatur eine Reihe prototypischer Aufbauten zur Erzeugung tatsächlich kontinuierlich wandernder Signale vorgestellt. So schlagen Enriquez und Kollegen eine pneumatisch-taktile Signalisierung vor ([EAYM01]). Über eine Pumpe wird Schrumpfschlauch mit einer Frequenz bis ca. 10 Hz auf- und leergepumpt. In einen in der Form einem Lenkrad nachgeahmten Ring integriert nimmt der Fahrer diese Anregung spürbar wahr. Im Experiment konnten durch das Signal Reaktionszeitverkürzungen bei einer visuellen Trackingaufgabe festgestellt werden. In [Bou85] wird vorgeschlagen, Richtungsinformation taktil über rotierende „Beulen“ zu übermitteln, die durch eine umlaufende Kugelskette im Lenkradring erzeugt werden. In alternativen Ausführungen wird weiter die Signalisierung über impulsförmig generierte Flüssigkeitswellen in einem umlaufenden Schlauch sowie über sukzessiv rotierende Elektromagneten zur Erzeugung einer Wanderwelle angedacht.

3.3.3. Lenkradhaltung im Realverkehr

Die Beurteilung der Wirkung haptischer Signale in der Lenkung, insbesondere beim Einsatz einseitiger Lenkradvibrationen, macht eine Analyse der von Fahrern eingenommenen Lenkradhaltungen notwendig. Dabei wird festgestellt, dass derartige Untersuchungen in der Literatur bislang wenig Beachtung finden: „Overlooked so far are drivers’ hand positions on the steering wheel. There are no systematic investigations of driver hand positions [...]“ ([WT05], S. 230); „However, there is little published data on how drivers grip the steering wheel [...]“ ([AHMG⁺02], S. 45). Dabei wird die Bedeutung der Lenkradhaltung durchaus erkannt, die nach Einschätzung von Green und Kollegen einen wesentlichen Einfluss auf den vom Fahrer gewünschten Unterstützungsgrad eines Lenkassistenzsystems hat ([GGR⁺84]).

Der Begriff *Lenkradhaltung* beschreibt mit der Position der Hände auf dem Lenkrad den *statischen* Parameter des Lenkverhaltens. In Analogie zum Ziffernblatt einer Uhr wird die Lenkradhaltung zumeist durch eine Uhrzeit angegeben, wobei die linke Hand dem Minutenzeiger und die rechte Hand dem Stundenzeiger entspricht. Als sicher werden die beidhändigen symmetrischen Lenkradhaltungen „Viertel-vor-3“ oder „10-vor-2“ empfohlen ([WT05], [Bro02]). Das *dynamische* Lenkverhalten wird durch die *Lenktechnik* beschrieben, also die Art und Weise, wie der Fahrzeugführer Lenkraddrehungen zur Kursführung ausführt. Empfohlen wird hier zumeist die „Push-Pull“-Technik ([Bro02]). Die Lenktechnik ist insbesondere bei Rangierbewegungen von Bedeutung, wenn hohe Lenkwinkelraten erzeugt werden müssen.

Walton & Thomas ([WT05]) bewerten die Lenkradhaltung von Fahrern im Realverkehr anhand der Anzahl der in der oberen Lenkradhälfte befindlichen und damit von außen sichtbaren Hände (im Folgenden als *Zielbereich* bezeichnet). In diesem Zielbereich wird die Anzahl der Hände der Fahrer durch externe Beobachter gezählt und in ein ordinales System kategorisiert (s. Abb. 3.13a). Nach Aussage der Autoren nimmt die Möglichkeit der Fahrzeugkontrolle in Gefahrensituationen mit der

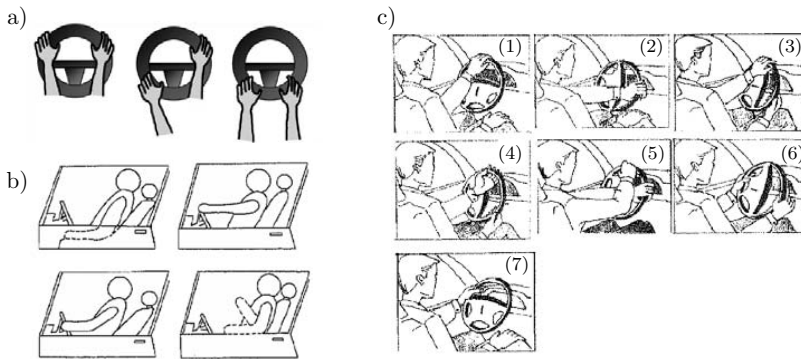


Abb. 3.13.: Studien zur Lenkradhaltung:

a) Klassifikation der Lenkradhaltung nach Walton & Thomas (v.l.n.r.): beide Hände, eine Hand, keine Hand im Zielbereich (entnommen aus [WT05]); b) Klassifikation der Position des linken Armes bzw. der linken Hand nach Viano und Kollegen (v.l.o.n.r.u.): Linker Arm auf Armlehne, linke Hand oben am Lenkrad, linke Hand seitlich am Lenkrad, linker Arm auf Fensterablage (entnommen aus [VPC89]); c) von Atkinson und Kollegen beobachtete Lenkradhaltungen (mit Änderungen entnommen aus [AHMG⁺02]).

Anzahl der Hände im Zielbereich zu. Sie stellen fest, dass in der Gesamtbetrachtung 50% der Fahrer nur eine Hand im Zielbereich haben; jeweils 25% führen das Fahrzeug mit beiden Händen im Zielbereich und beiden Händen außerhalb des Zielbereichs. Die Anzahl der Hände im Zielbereich nimmt bei Fahrten mit 100 km/h im Vergleich zu Fahrten mit 50 km/h signifikant zu, wohingegen sie mit zunehmendem Verkehrsaufkommen abnimmt. Weder das Unfallrisiko eines Messpunktes noch die befahrene Spur (bei mehrspurigen Fahrbahnen) haben einen messbaren Einfluss auf die Handverteilung. Nach Angabe der Autoren gibt es experimentelle Hinweise, nach denen die Anzahl der Hände im Zielbereich ein potentiell Maß für das wahrgenommene Risiko der aktuellen Verkehrssituation darstellt.

In einer weiteren Studie der Autoren ([TW07]) wird die Handanzahl im Zielbereich zwischen Fahrern von SUVs (*Sports Utility Vehicles*) und Fahrern normaler Fahrzeuge (im Folgenden als „Normalfahrer“ bezeichnet) verglichen. Über einen Fragebogen wird zusätzlich die Einschätzung der eigenen „typischen“ Lenkradhaltung sowie der Zusammenhang zwischen Lenkradhaltung, Fahrzeugkontrolle und Sicherheitsgefühl ermittelt. Die Kernergebnisse der Untersuchung sind, dass SUV-Fahrer im Vergleich zu Normalfahrern i. A. seltener beide Hände im Zielbereich platzieren (s. auch [o.V07]). Sowohl SUV- als auch Normalfahrer sind der Annahme, dass die beste Kontrolle über das Fahrzeug durch das Positionieren beider Hände in der oberen Lenkradhälfte ermöglicht wird. Diese Haltung wird zudem als die sicherste Lenkradhaltung angesehen. Deutliche Unterschiede bestehen zwischen der angegebenen und der tatsächlich beobachteten Lenkradhaltung; die Vpn überschätzen sich in der Angabe einer beidhändigen Lenkradhaltung in der oberen Lenkradhälfte. Während 71% der SUV-Fahrer (76,4% der Normalfahrer) angaben, typischerweise beide Hände im Zielbereich zu platzieren (26,9% (20,8%) nur eine Hand und 2,2% (2,8%) keine Hand), ergab die Beobachtung eine Verteilung von lediglich 24% (32,3%) mit beiden Händen, 49% (42,4%) mit nur einer Hand, und 27% (25,4%) mit keiner Hand im Zielbereich.

Eine weitere Untersuchung der Lenkradhaltung durch die externe Beobachtung des realen Straßenverkehrs führen Viano und Kollegen durch ([VPC89]). Zur Bewertung des Verletzungsrisikos bei seitlichen Auffahrunfällen an Kreuzungen werden Videos von Fahrern ausgewertet, die sich Kreuzungen annähern und an diesen zum Stehen kommen. Die beobachtete Position des linken Arms wird dabei in vier Kategorien eingeteilt: (1) Linker Arm nicht sichtbar auf der Armlehne unterhalb des Fensters, (2) linke Hand oben am Lenkrad, (3) linke Hand seitlich am Lenkrad und (4) linker Arm auf der Fensterablage (s. Abb. 3.13b). Während Autofahrer ihren linken Arm auf der offenen Straße in über 34% der Fälle seitlich ablegen, wird die Ablage an Kreuzungen nur zu 10,6% genutzt. Fast ein Viertel aller Fahrer führten die linke Hand nach dem Stehenbleiben an Kreuzungen an das Lenkrad, nachdem diese zuvor neben dem Lenkrad abgelegt war. Die Verwendung des Fenstervorsprungs

als Armablage hängt weniger von der Fahrsituation als von der Fahrzeugbauart und der Variation von Fenster- und Schulterhöhe ab.

Die in [TW07] festgestellte deutliche Abweichung der selbst wahrgenommenen von der tatsächlich beobachteten Lenkradhaltung, wird durch [GG05] bestätigt. In einem Fragebogen wird u. a. die eigene typischerweise eingenommene Handposition beim Lenken abgefragt. Während 75,5% nach eigenen Angaben mit beiden Händen lenken, verwenden 12,3% typischerweise nur die linke und 12% nur die rechte Hand. Bei einhändigem Lenken liegt die linke Hand nach eigenen Angaben am häufigsten auf der 1-Uhr (!) Position (31%) gefolgt von den Positionen 10 (29%) und 9 (18%), die rechte Hand ist bei einhändigem Lenken am häufigsten auf den Positionen 1 (37%), 2 (28%) und 3 (19%) platziert. Die Handposition bei beidhändigem Lenken kann aufgrund fehlender Angaben nicht ausgewertet werden.

Eine Studie von Atkinson und Kollegen ([AHMG⁺02]) untersucht die Gefahr, die von einem auslösenden Airbag auf die Unterarme der Fahrer ausgeht. Dazu wird die Lenkradhaltung von 30 Vpn unterschiedlicher Statur untersucht. Diese werden instruiert, im Fahrzeug ihre typische Lenkradhaltung in verschiedenen vorgegebenen Fahrsituationen einzunehmen. Um ein möglichst realistisches Bild zu gewinnen, wird der eigentliche Untersuchungsgegenstand nicht kommuniziert. Es konnten die in Abb. 3.13c) skizzierten Lenkradhaltungen identifiziert werden, von denen die Haltungen (1) bis (5) für die Autoren relevant sind, da in diesen der Unterarm in unmittelbarer Nähe zum Airbag positioniert wurde. Weiterhin wurde festgestellt, dass die große Mehrheit der Fahrer das Lenkrad lediglich mit der linken Hand und zumeist auf der 10 Uhr Position hält. Wird die rechte Hand eingesetzt, dann typischerweise zwischen 4 und 6. Während die Frauen in der Studie eher beidhändig fuhren, lenkten alle großen Männer nur mit einer Hand.

Trivedi & Cheng ([TC07]) sowie Cheng, Park & Trivedi ([CPT07]) werten die Position der Hände am Lenkrad sowie die Kopforientierung zur Fahrerabsichts- und aktivitätenerkennung aus. Die Hände werden mit Hilfe einer Wärmebildkamera detektiert, getrackt, und klassifiziert. Ob-

wohl damit die statistische Auswertung der Lenkradhaltung erfolgen kann, sind hierzu keine Arbeiten der Autoren bekannt. Ein weiteres Verfahren zur Handerkennung mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung stellen Reshetnev und Kollegen vor ([RVKJ06]). Hierzu werden die Hände im Bild einer Fahrzeuginnenraumkamera über eine Farbsuche, und anschließend das Lenkrad über eine Kantendetektion ermittelt. Obwohl technisch möglich wird auch hier keine statistische Auswertung der Lenkradhaltung durch die Autoren vorgenommen.

3.3.4. Zusammenfassung: gerichtete Lenkradvibrationen

Abgesehen von der Möglichkeit zur Überlagerung einer Lenkradvibration mit einem richtungsgebenden Lenkmoment existieren zwei prinzipielle Möglichkeiten zur Übermittlung gerichteter Lenkradvibrationen: die einseitige Applikation sowie die Anregung mit umlaufenden Vibrationen. Bei letzterer ist insbesondere die Unabhängigkeit von der Lenkradhaltung vorteilhaft, wobei über die von Fahrern im Realverkehr tatsächlich verwendete Lenkradhaltung bislang nur wenige Informationen verfügbar sind. Die Umsetzung des Konzeptes der umlaufenden Lenkradvibration ist mit einem erhöhten Hardwareaufwand verbunden. In der Literatur existieren bisher nur sehr wenig gesicherte Erkenntnisse zum Einsatz umlaufender Lenkradvibrationen.

Einseitige Lenkradvibrationen sind hingegen leichter zu realisieren. Dieses Konzept kann deshalb zur Übermittlung der Aufforderung zur Ausführung von Lenkhandlungen eingesetzt werden, weil Fahrer in der Lage sind, Rotationsbewegungen mit lateralen Eigenschaften zu belegen. In Studien wurden einseitige Lenkradvibrationen bereits in verschiedenen Anwendungen eingesetzt, wobei ein Hauptproblem in der mechanischen Entkopplung der Lenkradhälften identifiziert werden konnte. Noch relevanter ist die Tatsache, dass die Frage der zu verwendenden Reiz-Reaktions-Zuordnung in der Literatur bislang nicht abschließend geklärt werden konnte. Neben dem SRC-Prinzip sind hierbei semantische und pragmatische Inhalte der Warnung ebenso zu beachten, wie affektive Eigenschaften der Reize.

3.4. Psychophysische Grundlagen

3.4.1. Wahrnehmungskurven von Lenkradvibrationen

Seit den ersten Erhebungen vibrotaktiler Wahrnehmungsschwellen im Jahr 1926 durch Katz & Noldt (nach [Wil54]) wird die Vibrationswahrnehmung des Menschen in zahlreichen Folgestudien untersucht. Während diese ersten Experimente mithilfe von Stimmgabeln durchgeführt wurden, ermöglichten technische Weiterentwicklungen die besser kontrollier- und reproduzierbare elektrische Vibrationserzeugung in einem breiten Frequenz- und Amplitudenbereich ([LH37]). Die Art der Vibrationserzeugung (z. B. hydraulisch, elektromagnetisch, [Gri90]) richtet sich nach den Anforderungen an Frequenz- und Hubbereich.

In der psychophysischen Vibrationsforschung wird der Einfluss der unabhängigen Variablen *Frequenz* und *Beschleunigung* auf die subjektive Wahrnehmung und Empfindung der V_{pn} unter Berücksichtigung bestimmter Kontrollvariablen erhoben. Bei der Erhebung von Reizschwellen (auch Absolut- oder Detektionsschwellen) wird untersucht, wie stark ein Vibrationsreiz sein muss, um von den V_{pn} überhaupt wahrgenommen zu werden. Bei der Messung von Kurven gleicher Empfindung (ESC, *equal sensation contour/curve*) wird die Amplitude eines überschwelligen Testreizes variiert, bis dieser die gleiche Empfindung hervorruft wie ein Referenzreiz anderer Frequenz. Alternativ zur relativen Bewertung anhand einer Referenz kann die „Gleichheit“ von Empfindungen über eine absolute Skala operationalisiert werden. Zur Ermittlung von Komfort- und Toleranzschwellen werden überschwellige Reize hinsichtlich verbalisierter Komfort- oder Toleranzkriterien beurteilt.

Ein weiteres zentrales Konzept der Psychophysik ist die differentielle Wahrnehmbarkeitsschwelle (auch Unterschieds- oder Differenzschwelle) zur Beschreibung von Reizunterschieden, die im Englischen treffend als JND (*just noticeable difference*) bezeichnet wird. Man versteht hierunter den Betrag, um den ein Testreiz variiert werden muss, damit er sich gerade merklich von einem Referenzreiz unterscheidet ([Han05a]). Nach

Kenntnis des Autors wurden bislang keine JND von Lenkradvibrationen erhoben. Anhang A.2 enthält einen Literaturüberblick über Studien zur Erfassung psychophysischer Wahrnehmungsschwellen von Lenkradvibrationen. Diese werden im weiteren Verlauf näher betrachtet

Reizschwellen von Lenkradvibrationen

In der Literatur existieren zahlreiche Studien zur Erhebung von Vibrationsreizschwellen an verschiedenen Regionen des Körpers (z. B. [GCC96], [MD95], [Miw67a], [Miw67b], [MG08], [NUT⁺00], [Wil54]) sowie zum Einfluss von Größe und Form des vibrierenden Aktors bzw. der diesen umgebenden Freifläche (z. B. [GCC96], [Man05], [MG05], [Ver62], [Ver63], [Ver85]). Da die vorliegende Arbeit Lenkradvibrationen fokussiert, sind diese Untersuchungen von geringerer Relevanz. Dennoch muss beachtet werden, dass Lenkradhaltung und Griffkraft die Position und Größe der Kontaktfläche zwischen Händen und Lenkrad und damit letztlich die Wahrnehmung mechanischer Reize beeinflussen können.

Es werden umfangreiche Experimente zur Erhebung von Vibrationsreizschwellen an der Hand beschrieben (z. B. [Miw67b], [MG08], [RK77], [RSA77]). So werden bspw. in [MG08] mithilfe eines vibrierenden Zylindergriffs Reizschwellen in allen drei Raumrichtungen ermittelt (s. Abb. 3.14 *links*). Die dabei eingesetzten Aktoren weichen jedoch in der Form von Lenkrädern ab. Zudem bestehen Unterschiede zu den im Fahrzeug eingenommenen Körperhaltungen sowie Griffarten und -stärken ([HM04b]). Die Gültigkeit der ermittelten Reizschwellen ist damit im Kontext von Lenkradvibrationen nicht sichergestellt ([HM03]).

Aus diesem Grund wird zur Ermittlung von Reizschwellen in [Mor03b] eine in der Form einem Lenkrad nachempfundene Holzkonstruktion verwendet (s. Abb. 3.14 *mitte*). Die in Abb. 3.14 (*rechts*) dargestellten quantitativen Unterschiede in den Reizschwellenverläufen lassen sich zumindest teilweise auf methodische Differenzen zurückführen ([Mor03b]). Qualitativ weisen alle Absolutschwellen ab 20 Hz einen U-förmigen Verlauf mit maximaler Sensitivität im Bereich 80-150 Hz auf.

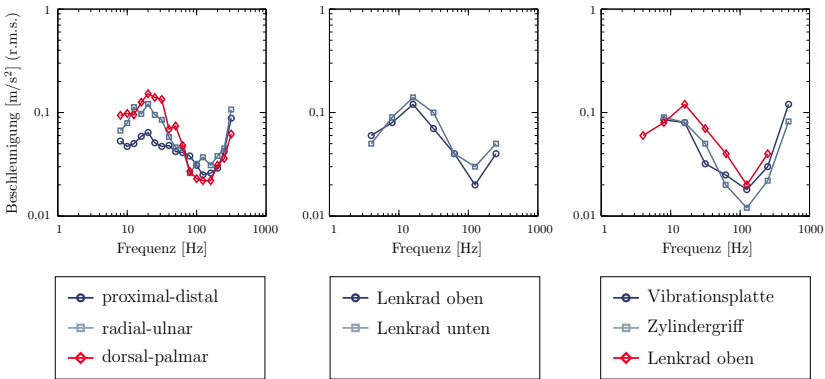


Abb. 3.14.: Vibrationsreizschwellen in der Hand:

Links: Reizschwellen am Zylindergriff in allen Raumrichtungen ([MG08]); *Mitte:* Reizschwellen am Lenkrad bei zwei verschiedenen Lenkradhaltungen ([Mor03b]); *Rechts:* Reizschwellen bei Verwendung verschiedener Aktoren ([MG05], [Mor03b]).

Kurven gleicher Empfindung von Lenkradvibrationen

Studien zur Erhebung von ESC von Lenkradvibrationen durch den Relativvergleich von Test- und Referenzreizen werden u. a. in [GSDR04], [GO99] sowie [SGDR01] beschrieben (s. auch Abb. 3.15 *links* und *mitte*). In [GO99] wird dabei ein statistisch signifikanter Einfluss der Griffkraft festgestellt, der nach Einschätzung der Autoren aber vernachlässigt werden kann, da die absoluten Unterschiede zumeist unter 5% liegen.

Während in [GO99], [GSDR04] und [SGDR01] diejenige Parametrierung durch die Vpn gefunden werden muss, die zu einer „Gleichheit der Empfindung“ von Test- und Referenzreiz führt, werden die Vpn in [AMTG05] instruiert, Testreize hinsichtlich gleich empfundener „Störung“ (*annoyance*) wie Referenzreize zu bewerten. In [AG07a], [AG07b] sowie [JAG09] werden ESC anhand der absoluten Empfindungsbeurteilung ermittelt. Hierzu bewerten Vpn die Intensität von Vibrationsstimuli auf der Borg CR10 Skala ([Bor98], s. Abb. E.1 in Anhang E).

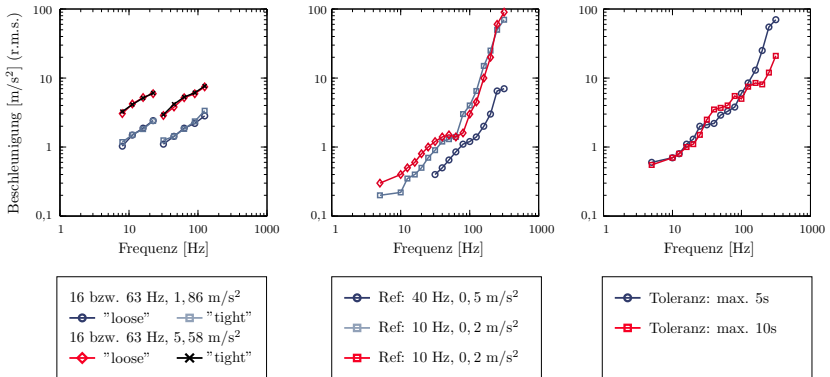


Abb. 3.15.: Lenkradvibrationen: Kurven gleicher Wahrnehmung und Toleranzschwellen:

Links: Einfluss der Griffstärke („loose“ bzw. „tight“) auf die ESC bei verschiedenen Referenzstimuli ([GO99], Referenzreize und Griffstärken s. Legende); *Mitte:* ESC für verschiedene Referenzstimuli ([SGDR01], Referenzreize s. Legende); *Rechts:* Toleranzschwellen für Lenkradvibrationen ([SGDR01], [GSDR04]).

Komfort- und Toleranzschwellen von Lenkradvibrationen

In [GA00] wird der Einfluss von Lenkradvibrationen auf das Diskomfortempfinden an verschiedenen Körperstellen (u. a. Hände und Arme) anhand der Bewertung von V_{pn} auf Likert-Skalen ermittelt. In [GSDR04] sowie [SGDR01] wird die Toleranzschwelle einer Lenkradvibration als diejenige Vibrationsstärke definiert, die von den V_{pn} als nicht länger als 5 bzw. 10 s zumutbar deklariert wird (vgl. Abb. 3.15 *rechts*).

Sowohl die Kurven gleicher Wahrnehmung als auch die Diskomfort- und Toleranzschwellen weisen auf eine reduzierte Hautsensitivität bei zunehmender Frequenz hin. Demnach werden Vibrationsreize gleicher Beschleunigung bei höheren Frequenzen schwächer empfunden als bei niedrigeren Frequenzen.

3.4.2. Interpretation von Lenkradvibrationen

In den in Abschnitt 3.4.1 angeführten Studien wird festgestellt, dass sowohl die Frequenz als auch die Beschleunigung einer Lenkradvibration einen Einfluss auf deren wahrgenommene Intensität hat. Daraus kann jedoch zunächst keine Aussage über die gefühlte Qualität abgeleitet werden. Im Kontext von FAS sind insbesondere die Qualitäten „Bedrohlichkeit“ und „Dringlichkeit“ einer Lenkradvibration relevant. Es stellt sich damit die Frage, ob die Interpretation von Lenkradvibrationen durch Parametervariation gezielt beeinflusst werden kann, und ob es insbesondere möglich ist, durch Lenkradvibrationen bestimmte Botschaften zu übermitteln. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurde im Kontext dieser Arbeit eine Studie als studentische Fallarbeit²³ durchgeführt, die im Folgenden beschrieben wird (s. auch [BEA⁺10]).

Methodisches Vorgehen

Aus dem Stand der Technik sind insbesondere drei Verfahren zur Erhebung der Wahrnehmung von Lenkradvibrationen bekannt: (1) Absolutbewertung auf einer Skala, (2) Relativvergleich mit einem Referenzreiz und (3) vollständiger Paarvergleich verschiedener Stimuli, die hinsichtlich einer bestimmten Dimension verglichen werden. Prinzipiell können diese Verfahren auch angewendet werden, um Lenkradvibrationen nicht hinsichtlich deren Intensität sondern bspw. hinsichtlich der wahrgenommenen „Bedrohlichkeit“ zu bewerten. Hierbei besteht jedoch die Gefahr, dass die Vpn letztlich doch die Intensität der Vibration beurteilen, und diese dann lediglich auf die ihnen vorgegebene Dimension projizieren.

In der vorliegenden Studie wurden die Dimensionen „Bedrohlichkeit“ und „Dringlichkeit“ aus diesem Grund in korrespondierende Botschaften

²³SIMON, N.; RIEDEL, S.; GASPERI, N.: Einfluss von Parametervariationen auf die subjektive Bewertung von Lenkradvibrationen. *Fallarbeit Verkehrs- und Ingenieurpsychologie*, Universität Tübingen, 2010.

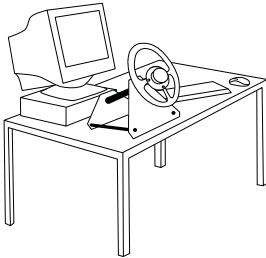


Abb. 3.16: Versuchsaufbau:

Schematische Darstellung des in der Studie zur Interpretation von Lenkradvibrationen verwendeten Versuchsaufbaus.

codiert. Die Vpn wurden instruiert, dass es sich bei den ihnen dargebotenen Vibrationsstimuli um Botschaften eines FAS handelt, die sie einer der folgenden Kategorien zuordnen sollten:

- (A) Achtung Gefahr:** bedrohlich und dringlich, Bsp. „*Sie kommen von der Fahrbahn ab!*“
- (B) Jetzt aufpassen:** dringlich, aber nicht bedrohlich, Bsp. „*Nehmen Sie diese Ausfahrt!*“
- (C) Gut gemacht:** weder dringlich noch bedrohlich, Bsp. „*Einparkvorgang beendet*“

Zur Vibrationserzeugung wurde ein Körperschallerzeuger mittig auf ein in einem Stativ frei drehbar gelagertes Lenkrad montiert (s. Abb. 3.16). Dieser wurde mit sinusförmigen Audiosignalen gespeist, die in Matlab (R2007b) generiert wurden. Zur Dämpfung des hörbaren Luftschalls wurde eine Filzunterlage unter dem Stativ eingesetzt. Zudem trugen die Vpn während des Versuchs Ohropax sowie einen Kapselgehörschutz. Die Steuerung des Versuchsablaufs sowie die Abfrage der abhängigen Variablen (AV) wurden ebenfalls in Matlab umgesetzt.

Am Versuch nahmen 24 Vpn (7m, 17w) im Alter von 18 bis 30 Jahren ($M = 22,2$, $SD = 3,3$) teil. Nach der Instruktion über den Versuchszweck sowie 3 Übungsdurchgängen folgten die Experimentaldurchgänge. Während der gesamten Versuchsdauer wurde eine Grundvibration am

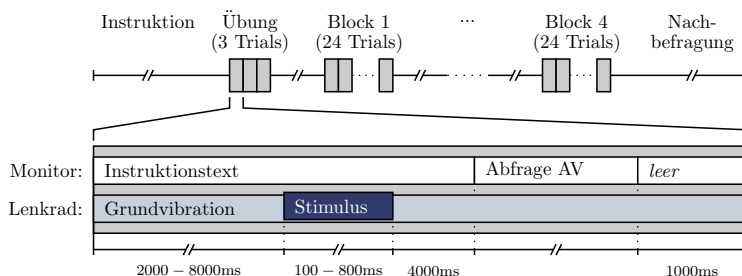
Lenkrad wiedergegeben, über die fahrtinduzierte Anregungen nachgebildet wurden. Die Grundvibration wurde vorab durch Beschleunigungsmessung am Lenkrad bei der Fahrt über eine Autobahn aufgenommen. Ihr wurden Vibrationsstimuli überlagert, die sich deutlich abhoben und als Botschaften eines FAS deklariert wurden. Als unabhängige Variablen (UV) wurden die Frequenz (42, 60, 85, 120, 170, 240 Hz), die Amplitude (25, 50, 75, 100% der Maximalamplitude²⁴ sowie die Dauer (100, 200, 400, 800 ms) der Vibrationsstimuli variiert.

Ein Trial stellt die kleinste Einheit der Aufgabe dar. Zu Beginn eines jeden Trials wurde die Instruktion „Sie fahren auf der Autobahn mit konstanter Geschwindigkeit“, auf dem Monitor vor den Vpn eingeblendet. Nach 2 bis 8 s (gleichverteilt über alle Stimuli) wurde ein Vibrationsstimulus dargeboten. Im Anschluss sollten die Vpn den Stimulus einer der Botschaften (A) bis (C) zuordnen und ihre Sicherheit bei dieser Zuordnung angeben (5-stufige Likert-Skala von „*ich bin mir überhaupt nicht sicher*“ bis „*ich bin mir völlig sicher*“). Zusätzlich sollten die Vpn die Intensität des Stimulus auf der Borg CR10 Skala bewerten (s. Abb. E.1 in Anhang E). Es ergibt sich ein dreifaktorielles Versuchsdesign mit vollständiger Messwiederholung und $6 \times 4 \times 4 = 96$ diskreten Stimuli, die randomisiert in 4 Blöcken mit jeweils 24 Trials dargeboten wurden. Zwischen den Blöcken konnten Pausen selbstbestimmter Dauer eingelegt werden. Während des Versuchs wurden die Vpn gebeten, das Lenkrad in der „Viertel-vor-Drei“-Position zu greifen (vgl. Abschnitt 3.3.3). Der Versuchsablauf ist schematisch in Abbildung 3.17 dargestellt.

Datenbereinigung

Bei Vibrationsstimuli mit einer Frequenz von 60 Hz wird das Lenkrad im resonanznahen Zustand betrieben, wodurch diese Stimuli unverhältnismäßig stärker wirken. Dies wird durch die Messung der auftretenden

²⁴Die Maximalamplitude entspricht der maximalen Lautstärke des Audiosignals, welches zur Vibrationserzeugung an den Körperschallerzeuger angelegt wurde. In Anhang E sind die gemessenen Beschleunigungswerte angegeben.

**Abb. 3.17.: Versuchsablauf:**

Schematische Darstellung eines Trials sowie Zusammensetzung der Trials zum Gesamtversuch

Beschleunigungen bestätigt. Stimuli bei 60 Hz wurden von der weiteren Datenauswertung ausgeschlossen. Weiterhin wurden alle Datensätze ausgeschlossen, bei denen die Vibrationsintensität mit 0 bewertet wurde, was instruktionsgemäß bei nicht spürbaren bzw. nicht von der Grundvibration unterscheidbaren Stimuli erfolgen sollte. Von den ursprünglich 2304 erhobenen Datensätzen (vollständige Bewertung von 96 Stimuli durch 24 Vpn) verbleiben für die nachfolgenden Auswertungen somit 1856 Datensätze, was einem Mittel von 23,2 Datensätzen je Stimulus entspricht.

Eignung der Stimuli zur Übermittlung einer Botschaft

Damit ein Stimulus im Sinne der Forschungsfrage geeignet ist, Verhalten konsistent zu beeinflussen, sollten die Vpn diesen mit hoher Übereinstimmung derselben Botschaft zuordnen und sich dabei möglichst sicher sein. Die Sicherheit der Vpn bei der Zuordnung wurde dazu auf das Intervall 0 (*überhaupt nicht sicher*) bis 1 (*völlig sicher*) gleichabständig umcodiert, und anschließend für jede Kombination aus Stimulus und Botschaftenzuordnung gemittelt. Es wird das Maß „Eignung eines Stimulus bzgl. einer Zuordnung“ (kurz *Eignung*) als Produkt der relativen Häufigkeit jeder Kombination aus Stimulus und Zuordnung mit der

korrespondierenden mittleren Sicherheit eingeführt (vgl. Tabelle 3.2). Dieses Maß stellt die logische Konjunktion der Anforderungen „hohe Übereinstimmung“ und „hohe Sicherheit“ dar.

Es wird nun weiter gefordert, dass ein Stimulus nicht nur möglichst geeignet zur Übermittlung einer bestimmten Botschaft sondern gleichzeitig auch möglichst ungeeignet zur Übermittlung der konkurrierenden Botschaften sein muss. Als inhaltlich fundiertes Maß entsteht so die „diskriminative Eignung bzgl. einer Zuordnung“ (kurz *diskriminative Eignung*) aus der Eignung zur Übermittlung einer Botschaft abzüglich der Eignungen bzgl. der anderen Botschaften (vgl. Tabelle 3.2). In Abb. 3.18 ist die diskriminative Eignung der Stimuli über die Größe der Kästen codiert. Einige Stimuli weisen eine negative diskriminative Eignung auf, was bedeutet, dass die Eignung dieser Stimuli zur Übermittlung einer speziellen Botschaft nicht größer ist als die Summe der Eignungen zur Übermittlung der konkurrierenden Botschaften.

Die diskriminative Eignung ermöglicht das Aufstellen einer Rangordnung. Von den im Rahmen dieser Studie untersuchten Stimuli ist demnach eine Vibration bei 42 Hz, einer Amplitude von 100% sowie einer Dauer von 800 ms am besten geeignet, Botschaft (A) zu übermitteln. Für Botschaft (B) wurde die Vibration mit 120 Hz, 50% Amplitude und 400 ms Dauer, und für Botschaft (C) die Vibration mit 85 Hz, 25% Amplitude und 100 ms Dauer als am meisten geeignet identifiziert. In den

Tab. 3.2.: Erläuterung der Maße „Eignung“ und „diskriminative Eignung“ eines Stimulus zur Übermittlung einer bestimmten Botschaft anhand eines Rechenbeispiels eines fiktiven Stimulus.

	(A)	(B)	(C)
Zuordnung (rel. Häufigk.)	70%	20%	10%
mittlere Sicherheit	0,75	0,25	0,25
Eignung	0,525 (= $0,7 \cdot 0,75$)	0,05	0,025
diskriminative Eignung	0,45 (= $0,525 - 0,05 - 0,025$)	-0,5	-0,55

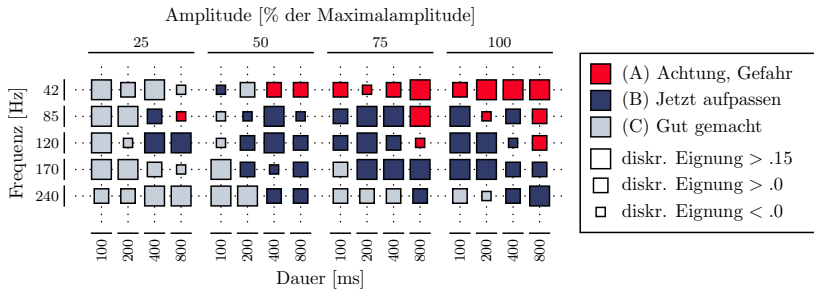


Abb. 3.18.: Zuordnung zu den Botschaften (A) bis (C):

Meistgewählte Zuordnung der Stimuli zu den Botschaften (A) bis (C) unter Berücksichtigung der diskriminativen Eignung (die Schwelle 0,15 ist frei gewählt).

Tabellen E.2 bis E.4 in Anhang E sind die 10 Stimuli mit der höchsten diskriminativen Eignung bzgl. jeder Botschaft aufgeführt.

Einfluss von Parameteränderungen auf die Vibrationsbewertung

Abb. 3.19 (*links*) visualisiert den Zusammenhang zwischen der empfundenen Vibrationsintensität und der Zuordnung der Stimuli zu den Botschaften (A), (B) bzw. (C). Demnach werden Stimuli, die als Botschaft der Art „Achtung, Gefahr“ verstanden werden, auch als stärker wahrgenommen, während Botschaften der Kategorie „Gut gemacht“ weniger stark empfunden werden. Über die Intensität kann der Einfluss von Parameteränderungen genauer analysiert werden, als dies mit der lediglich dreistufigen Zuordnung der Botschaften möglich ist. In Abb. 3.19 (*rechts*) ist dargestellt, welchen Einfluss eine Erhöhung von Stimulusfrequenz, -amplitude bzw. -dauer auf die empfundene Vibrationsintensität hat. Dabei wurden jeweils Stimuli miteinander verglichen, die sich lediglich in einem Parameter und in diesem nur um eine Ausprägung unterscheiden.

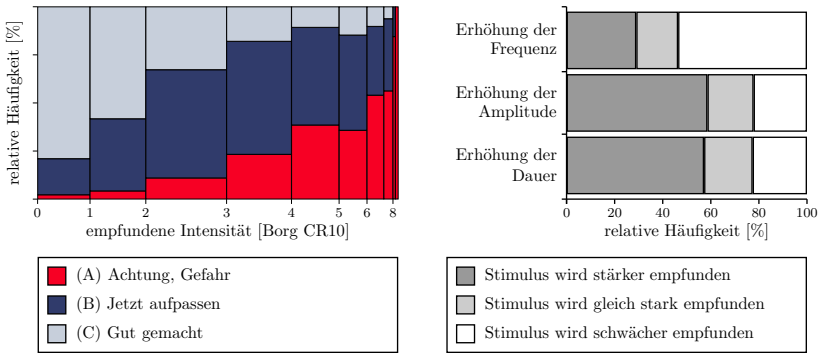


Abb. 3.19.: Vibrationsintensität:

Links: Mosaikplot zum Zusammenhang zwischen der empfundenen Vibrationsintensität und der Botschaftenzuordnung; *Rechts:* Einfluss von Variationen der Stimulusparameter auf die empfundene Intensität der Vibration.

Diskussion der Ergebnisse

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse können keine exakten Parameterwerte für Lenkradvibrationen empfohlen, sondern lediglich allgemeine Gestaltungshinweise gegeben werden.

Um den Einfluss von Parametervariationen auf die Interpretation von Vibrationsstimuli am Lenkrad zu untersuchen, sollten die Vpn die Stimuli als Botschaften eines FAS interpretieren, die sich hinsichtlich der Bedrohlichkeit sowie Dringlichkeit unterscheiden. Es gilt als wahrscheinlich, dass die Vpn bei der absoluten Bewertung der Vibrationsstimuli den relativen Vergleich zu bereits dargebotenen Stimuli heranzogen. Es ist deshalb u. a. davon auszugehen und zu bemängeln, dass die von der Auswertung ausgeschlossenen deutlich stärkeren Vibrationen bei 60 Hz auch die Bewertungen der anderen Stimuli beeinflussen. Zwar sind damit keine Aussagen über die absolute Stärke des Einflusses verschiedener Vibrationsparameter auf die Interpretation möglich, durchaus jedoch über die Art des Einflusses.

Während als Ergebnis für die Botschaft „Achtung, Gefahr“ insbesondere Stimuli bei tiefer Frequenz, hoher Amplitude sowie langer Dauer geeignet erscheinen, sind dies für die Botschaft „Jetzt aufpassen“ eher Stimuli im Bereich mittlerer Frequenzen, Amplituden und Dauern (jeweils bezogen auf den untersuchten Parameterraum). Zur Übermittlung der Botschaft „Gut gemacht“ scheint die Frequenz der Stimuli eine untergeordnete Rolle zu spielen. Hier sind insbesondere Stimuli geringer Amplitude sowie kurzer Dauer geeignet. Für jede Botschaft konnten Stimuli gefunden werden, bei denen die Zuordnung der Vpn hoch signifikant ($p < .001$) von einer zufälligen Auswahl abweicht.

Es konnte ein Zusammenhang zwischen der empfundenen Vibrationsintensität und der Zuordnung zu einer Botschaft gefunden werden. Je stärker die Vibration empfunden wird, desto eher wird die Botschaft der Kategorie „Achtung, Gefahr“ zugeordnet. Schwach empfundene Vibrationen werden hingegen eher als Hinweis der Art „Gut gemacht“ interpretiert. Weiterhin konnte das aus der Literatur bekannte sinkende Intensitätsempfinden für zunehmende Frequenzen sowie für abnehmende Amplituden in der vorliegenden Studie bestätigt werden. Neu hingegen sind die Beobachtungen zum Einfluss der Vibrationsdauer, der in der Literatur bislang nicht eindeutig bestimmt werden konnte ([HM04a]). Aus den vorliegenden Ergebnissen kann eine Zunahme der empfundenen Intensität bei einer Erhöhung der Stimulusdauer festgestellt werden. Diese Erkenntnisse werden in einer Folgestudie vertieft, die zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch nicht abgeschlossen ist.

4. Konkretisierung des Handlungsbedarfs

Die Analyse des Standes der Technik zeigt die hohe Anzahl an Forschungstätigkeiten im Bereich der synthetischen haptischen Signalisierung am Lenkrad, die bereits heute in Serienentwicklungen münden. Primäres Einsatzgebiet sind Spurverlassenswarnsysteme, wobei eine mechanische Anregung am Lenkrad die Notwendigkeit einer Reaktion an eben diesem aufzeigt, und Interpretationsvorteile durch die Übereinstimmung von Reiz- und Reaktionsort erwartet werden. Eine Vibration am Lenkrad scheint dabei ein geeignetes Warnsignal zu sein.

Eine detaillierte Betrachtung der in Studien eingesetzten Warnsignale zeigt, dass „Lenkradvibrationen“ zumeist als Lenkradrütteln über alternierende Lenkmomente realisiert werden – mit teilweise beträchtlichen Unterschieden in den untersuchten Signalparametern. So werden bspw. Rüttelsignale mit Frequenzen von 5 Hz ([SJ03]) bis 20 Hz ([Rot95]) umgesetzt. Große Schwankungen sind auch in den Lenkmomentstärken zu erkennen (s. Tab. A.2 in Anhang A.1), so dass das Ableiten gesicherter Erkenntnisse erschwert wird. Für die vorliegende Arbeit werden aus den Ergebnissen publizierter Studien Hypothesen abgeleitet, die es zu Überprüfen gilt. Demnach scheint ein aus Nutzersicht optimales Spurverlassenswarnsignal ein Lenkradvibrieren oder -rütteln zu sein, das zusätzlich eine Richtungsinformation enthält.

Es wird ein deutlicher Handlungsbedarf auf dem Gebiet der taktilen, über Unwuchtmotoren erzeugten Lenkradvibrationen erkannt, die in der Literatur bisher kaum betrachtet werden. Dabei sind die Wechselwirkungen mit dem Fahrer bei rein taktilen Signalen weit weniger komplex als bei propriozeptiven Signalen in Form von Lenkmomenten, wo bspw. reflexartige Gegenlenkreaktionen ausgelöst werden können. Die Haut der Handinnenfläche ist für Vibrationen in einem Bereich von 80 bis

150 Hz sehr sensitiv, und durch Variation der Vibrationsparameter können unterschiedliche Botschaften über Lenkradvibrationen an den Fahrer übermittelt werden. Weiterhin ermöglicht die räumliche Verteilung von Unwuchtmotoren das Erzeugen von Lenkradvibrationen, die gleichzeitig Richtungshinweise übermitteln. Es wird insbesondere angenommen, dass durch einseitig applizierte Vibrationen (vgl. Abschnitt 3.3.1) die semantische Bedeutung des Abkommens in den Spurrand übermittelt werden kann, woraus sich die Eignung der einseitigen Lenkradvibration als Spurverlassenswarnsignal ableiten lässt. Dieses Potential wird für umlaufende Lenkradvibrationen (vgl. Abschnitt 3.3.2) nicht gesehen. Diese werden auch aus diesem Grund im weiteren Verlauf nicht betrachtet, und das Konzept der einseitigen Lenkradvibrationen wird in den Fokus der Arbeit gerückt.

Nr.	Bezeichnung	Beschreibung	Kapitel
1	SRC	Reiz-Reaktions-Kompatibilität bei vibrotaktilem Anregung	6
2	LDW	Subjektiver Vergleich haptischer Spurverlassenswarnsignale	7
3	FCW	Haptische Ausweichempfehlung	8

Abb. 4.1.: Übersicht der Hauptstudien:

Übersicht der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Hauptstudien mit Verweis auf die Kapitel dieser Arbeit.

Die vorliegende Arbeit untersucht empirisch zunächst die natürliche Reaktion auf einseitige Lenkradvibrationen, und vergleicht diese anschließend mit weiteren haptischen Lenkradsignalen in der Anwendung als Spurverlassenswarnsignal. Abschließend wird der Versuch unternommen, den reaktionsinitiierenden Charakter des Signals über die Anwendung im Spurverlassensfall hinaus auf die Anwendung als Warnsignal in einer drohenden Frontalkollisionssituation zu übertragen (s. Abb. 4.1). Es werden dazu die drei folgenden Haupthypothesen formuliert.

Haupthypothese H.SRC:

„Einseitige Lenkradvibrationen werden im Fahrzeug zweckmäßig mit einer kontralateralen Reiz-Reaktions-Zuordnung eingesetzt.“

Kapitel 6 widmet sich dieser Hypothese anhand der Frage nach der Existenz einer unmittelbaren und intuitiven Reaktion auf einseitige Lenkradvibrationen. Lenken Fahrer eher in Richtung einer einseitigen Lenkradvibration (ipsilateral) oder in die entgegengesetzte Richtung (kontralateral)?

Haupthypothese H.LDW:

„Die einseitige Lenkradvibration wird als Spurverlassenswarnsignal subjektiv präferiert.“

In Kapitel 7 ab S. 105 werden die aus dem Stand der Technik abgeleiteten Hypothesen zu haptischen Spurverlassenswarnsignalen in der Lenkung überprüft. Neben der Frage der durch haptische Signale hervorgerufenen Assoziationen mit Fahrsituationen werden verschiedene haptische LDW-Signale vergleichend gegenübergestellt und von den Vpn nach subjektiven Kriterien bewertet. Es werden Eigenschaften analysiert, die die subjektiv empfundene Eignung beeinflussen.

Haupthypothese H.FCW:

„Die einseitige Lenkradvibration kann in einer drohenden Kollisionssituation eine Ausweichreaktion hervorrufen.“

In der in Kapitel 8 ab S.137 beschriebenen Anwendung als Warnausgabe eines Frontalkollisionswarnsystems sollen durch das Warnsignal gerichtete Ausweichreaktionen bei einem plötzlich auftauchenden Hindernis ausgelöst werden. Im Fokus der Studie stehen weiterhin die objektive Eignung des Warnsignals in der Spurverlassenssituation sowie Fahrerreaktionen auf Falschwarnungen.

5. Allgemeine Methodik

5.1. Technische Realisierung

5.1.1. Auswahl der Untersuchungsumgebung

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien wird ein durchgängiges Versuchskonzept angestrebt. Die Anforderungen an die Untersuchungsumgebung sind dabei unterschiedlich. Während in der SRC-Studie (Kapitel 6) aus methodischer Sicht teilweise eine möglichst abstrakte und kontextfreie Umgebung gewünscht ist, muss in der FCW-Studie (Kapitel 8) eine kritische Kollisionssituation im Fahrzeugumfeld erzeugt werden, ohne dabei Personen oder Material zu gefährden. Abb. 5.1 gibt einen Überblick über mögliche Untersuchungsumgebungen sowie die für die vorliegende Arbeit vorgenommene Auswahl.

	Studie SRC	Studie LDW	Studie FCW
abstrakte Laborumgebung	gut geeignet für Gruppe OS, nicht einsetzbar für Gruppe MS	nicht geeignet	nicht geeignet
statischer Fahrsimulator	gut geeignet für Gruppe MS, anpassbar für Gruppe OS	gut geeignet	geeignet für Hauptfrage
dynamischer Fahrsimulator	zu aufwändig	zu aufwändig	gut geeignet
Realfahrzeug	zu aufwändig	zu aufwändig	kritische Situation schwer realisierbar

Abb. 5.1.: Auswahl der Untersuchungsumgebung.

Eine abstrakte Laborumgebung wie bspw. in der Untersuchung zur Interpretation von Lenkradvibrationen (Abschnitt 3.4.2) kann lediglich für

eine Teilgruppe der Stichprobe in Studie SRC zum Einsatz kommen (vgl. Methodendiskussion in Abschnitt 6.3.2). Für die Umsetzung von Fahraufgaben (Teilgruppe 2 in Studie SRC sowie Studien LDW und FCW) ist eine derartige Umgebung hingegen nicht geeignet. Ein dynamischer Fahrsimulator mit Bewegungsrückmeldung kann zwar für alle Studien eingesetzt werden, häufig ist der hierdurch generierte Aufwand jedoch nicht notwendig für die konkrete Fragestellung. Ähnliches gilt für Umsetzungen im Realfahrzeug, wobei zusätzliche Anforderungen durch das Sicherstellen eines gefähderungsfreien Ablaufs, insbesondere in der umzusetzenden Kollisionssituation in der FCW-Studie entstehen. Ein statischer Fahrsimulator stellt für alle Studien eine geeignete Untersuchungsumgebung dar. Die Arbeitsgruppe für Mensch-Maschine Interaktion der zentralen Konzernforschung der Robert Bosch GmbH betreut einen derartigen Simulator, so dass sich weitere Vorteile hinsichtlich der zeitlichen Verfügbarkeit, des Zeitaufwands für die Versuchsvorbereitung und -durchführung sowie der entstehenden Kosten ergeben.

Aufgrund der Rückwirkung von Lenkmomenten auf die Fahrdynamik und der damit verbundenen kinästhetischen Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung ist die Erhebung subjektiver Bewertungen von Lenkmomenten in statischen Fahrsimulatoren u. U. kritisch zu sehen. Für die subjektive Bewertung der Lenkradvibrationen, die keine Rückwirkung auf die Fahrdynamik haben, ergeben sich hierdurch keine Einschränkungen. Bei den vergleichsweise geringen Lenkmomentstärken, die in der LDW-Studie (Abschnitt 7) zum Einsatz kommen, werden die fehlende kinästhetische Rückmeldung und der methodische Mangel durch die statische Versuchsumgebung als vernachlässigbar eingestuft. Dennoch soll diese Tatsache nicht unerwähnt bleiben.

5.1.2. Aufbau und Messkonzept des Fahrsimulators

Kern des statischen Fahrsimulators der Robert Bosch GmbH am Standort Schwieberdingen bildet ein Fahrzeugaufbau (Mock-up) sowie eine 180°-Rundleinwand, welche die Bilder dreier Projektoren übergangslos kombiniert (s. Abb. 5.2). Zur Darstellung von Systemzuständen und zur

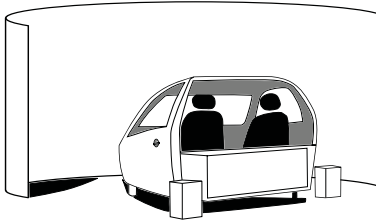


Abb. 5.2: Fahrsimulatorlabor:

Schematische Darstellung von Mock-up sowie Rundleinwand.

Aufnahme von Fahrereingaben ist ein Touchscreen vor der Mittelkonsole in Höhe des Kombiinstrumentes angebracht.

Zur Generierung und Darstellung der Szenerie sowie zur Simulation der Fahrdynamik wird die kommerzielle Software StiSim Drive 500 der Firma Systems Technology Inc. verwendet ([ARA⁺98]). Die für die jeweiligen Studien spezifischen Anforderungen wie bspw. die Programmierung der Nebenaufgabe in der SRC-Studie oder die Umsetzung der grafischen Benutzeroberfläche auf dem Touchscreen in der LDW-Studie wurden mit Visual Basic in der Version V6.0 realisiert. Als Fahrereingaben dienen der Simulationssoftware die Ausgaben des Lenkwinkelsensors sowie der Inkrementalgeber an den Fahrpedalen. Die Software speichert sämtliche Fahr- und Streckendaten (Lenkwinkel, Pedalposition, zurückgelegte Wegstrecke etc.) mit einer Abtastrate von 10 Hz. Insbesondere für die Messung von Reaktionszeiten (Kapitel 6) ist diese Abtastrate zu gering, so dass der Lenkwinkel, der zur Ermittlung der Lenkreaktionszeit ausgewertet wurde, über den CAN¹-Bus mit einer Abtastrate von 100 Hz aufgezeichnet wurde. Die über den CAN-Bus an das Simulatornetzwerk angeschlossene Lenkanlage (VW Touran) ermöglicht die Applikation synthetischer Lenkmomente. Im normalen Simulationsbetrieb werden natürliche fahrtinduzierte Lenkmomente simuliert, die insbesondere aus der Interaktion von Reifen und Fahrbahn entstehen. Zusätzlich können synthetische Lenkmomente im Bereich von $-4,4 \text{ Nm}$ bis $+4,4 \text{ Nm}$ unabhängig von der Simulation erzeugt werden.

¹Controller Area Network: Standard-Feldbus im Automobilbereich.

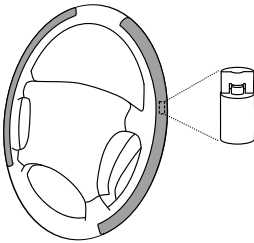


Abb. 5.3: Aufbau des Vibrationslenkrads:

Von einem Serienlenkrad wurden seitlich Segmente entfernt (grau markiert), mit Vibrationsmotoren bestückt und mit einer mechanisch dämpfenden Schaumstoffschicht wieder an das Lenkrad angebracht.

5.1.3. Aufbau des Vibrationslenkrads

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird ein Lenkrad benötigt, welches in der Lage ist, differenzierbare einseitige Vibrationen zu erzeugen. Von zu anwendungsfernen Umsetzungen wie bspw. Holz- oder Schlauchkonstruktionen (z. B. [Mor03b], [EAYM01]) oder Videospiellenkrädern (z. B. [KM⁺H09]) ist Abstand zu nehmen, so dass als Basis ein Serienlenkrad dient. Anpassungen wurden derart vorgenommen, dass die Präsenz der Vibrationselemente nicht offensichtlich, und die Lenkradgrundform nicht unnatürlich verändert wird (wie bspw. in [HR10]). Bei dem konstruierten Vibrationslenkrad sind die Vibrationselemente in den Lenkring integriert. Durch mechanische Adaptionen wird die Übertragung von Vibrationen von der aktiven auf die inaktive Seite minimiert. Aus einem BMW 4-Speichen-Multifunktionslenkrad wurden beidseitig Segmente des Lenkrings von ca. 105° entfernt und mit jeweils 8 Vibrationsmotoren (Unwuchtmotoren, \varnothing 6 mm, L = 17 mm) äquidistant bestückt. Anschließend wurden die Segmente mit einer mechanisch dämpfenden Schaumstoffschicht an den Kontaktstellen über Klebeverbindungen wieder an das Lenkrad angebracht (s. Abb. 5.3).

Die Ansteuerung der Vibrationsmotoren erfolgt über CAN-Befehle, wobei beide Lenkradhälften unabhängig voneinander aktiviert werden können. Diese werden von einer Mikrocontrollerschaltung in Steuersignale umgewandelt, die über Darlington-Stufen die Versorgungsspannung der Vibrationsmotoren schalten. Die Auswahl der aktiven Vibrationsmotoren je Seite erfolgt statisch über DIP-Schalter auf einer Platine, die unter der Abdeckung des Lenkradtopfs angebracht wurde.

Die Versorgungsspannung der Vibrationsmotoren wurde derart gewählt, dass diese Vibrationen mit einer Frequenz um 100 Hz ausführen. Über die Anzahl der aktiven Unwuchtmotoren kann die Vibrationsstärke diskret beeinflusst werden. Ziel der Parametrierung vor der ersten Studie war es, eine affektiv neutrale Lenkradvibration mit minimaler Vibrationsübertragung auf die passive Lenkradhälfte darzubieten. Die Einstellungen der SRC-Studie wurden für die anschließenden Studien weitestgehend² beibehalten. Je Seite waren jeweils ein bis zwei Unwuchtmotoren aktiv. Vor und nach jeder Vp wurden die Spannungsversorgung sowie die Stromaufnahme der Motoren überprüft und dokumentiert, so dass Ausfälle detektiert werden konnten. Alle dadurch bedingten Änderungen in den Einstellungen wurden ebenfalls dokumentiert.

5.2. Probandenakquise

Zur Akquise der Vpn wurde die Probandendatenbank³ der Robert Bosch GmbH genutzt, in der sowohl unternehmensinterne als auch -externe Versuchspersonen registriert sind. Zur Auswahl der Kohorte bspw. nach Alter, Geschlecht oder allgemeiner Bereitschaft zur Teilnahme an einer Fahrsimulatorstudie sind Filtereinstellungen möglich. Über Ergänzungsfragebögen können zusätzliche Einschränkungen vorgenommen werden. So wurden in allen Studien im Rahmen dieser Arbeit bspw. Vpn ausgeschlossen, die ein Spurverlassenswarnsystem im eigenen Fahrzeug besitzen bzw. Erfahrung im Umgang mit einem derartigen System haben. Anhand des Ergänzungsfragebogens wurde weiterhin sichergestellt, dass alle Vpn im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis und (korrigiert) normal-sichtig waren.

Alle Vpn nahmen freiwillig an den Studien teil und bezeugten dies mit der Unterschrift auf einer Einwilligungserklärung. Keine Vp nahm an mehreren im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien teil. Alle

²Durch Ausfall eines Vibrationsmotors mussten kurzfristige Änderungen in den Einstellungen vorgenommen werden.

³<http://www.studien.bosch.de>

personenbezogenen Daten wurden pseudonymisiert verarbeitet. Nicht pseudonymisierbare Daten wie bspw. Videoaufzeichnungen wurden zugriffsgeschützt gespeichert und nach Abschluss der jeweiligen Studie gelöscht. Zur Motivation wurden in der SRC-Studie Akkuschrauber für die Vpn mit den schnellsten Reaktionsleistungen ausgegeben. Die Teilnahme an der LDW- bzw. FCW-Studie wurde mit einem Einkaufsgutschein eines Online Versandhauses vergütet.

6. Reiz-Reaktions-Kompatibilität bei vibrotaktiler Anregung

„Einseitige Lenkradvibrationen werden im Fahrzeug zweckmäßig mit einer kontralateralen Reiz-Reaktions-Zuordnung eingesetzt.“

(Haupthypothese H.SRC)

6.1. Einführung und Methodik

6.1.1. Motivation, Fragestellungen und Hypothesen

Die Applikation einseitiger Lenkradvibrationen wird in der Literatur als Möglichkeit erkannt, Fahrer zu einer Lenktätigkeit aufzufordern und ihnen gleichzeitig die Richtung der Lenkreaktion anzuzeigen. Während in [KMH⁺09] Navigationsinformationen über einseitige Vibrationen am Lenkrad übermittelt werden (ipsilaterale Zuordnung), sollen diese in [NMF⁺08] vor drohendem Spurverlassen warnen (kontralateral). In beiden Fällen konnten die Vpn die Zuordnung sehr schnell in instruktionskonforme Reaktionen umsetzen. Für künftige Anwendungen ist jedoch eine Entscheidung bezüglich der zu verwendenden Reiz-Reaktions-Zuordnung (im weiteren Verlauf auch als *Mapping* bezeichnet) zu treffen. Es wurde deshalb im Rahmen einer Studie untersucht, ob eine intuitive Reaktion auf einseitige Vibrationsstimuli existiert, und in welche Richtung diese ggf. ausfällt (s. auch [BWA10]).

Zunächst sind Fahrer-inhärente Einflüsse auf die Reaktion zu beachten. Sofern ein SRC-Effekt bei vibrotaktiler Reizung und Lenkreaktionen existiert, ergeben sich Leistungsvorteile bei ipsilateralem Lenken in

Richtung der Vibration. Weiterhin wird erwartet, dass durch die einseitige Vibration eine Hand stärker als die andere zur Ausführung der motorischen Handlung aktiviert wird, so dass die Entscheidung zwischen einem Lenken „nach links oder nach rechts“ in eine Entscheidung zwischen „Ziehen oder Schieben mit der aktiven Hand“ umcodiert wird. Da diese Reaktionsalternativen durch verschiedene Muskelgruppen ausgeführt werden (vgl. Abschnitt 3.2.4), sind motorisch bedingte Leistungsvorteile eines Mappings nicht auszuschließen.

Zusätzliche Einflüsse ergeben sich durch das Warnsignal selbst. Über semantische und pragmatische Inhalte kann die Stimulusinterpretation beeinflusst werden. Dies kann durch Instruktion erfolgen, idealerweise wird die Interpretation aber durch das Signal selbst suggeriert. Auch kann nicht ausgeschlossen werden, dass affektive Eigenschaften des Warnsignals, wie etwa eine subjektiv als „hart“ oder „weich“ empfundene Vibration, die Fahrerreaktion beeinflussen (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Neben der zu Beginn dieses Kapitels angeführten Haupthypothese können für die vorliegende Studie auf Basis theoretischer Überlegungen und empirischer Befunde die folgenden Unterhypothesen gebildet werden:

H.SRC.1: Eine als neutral empfundene einseitige Lenkervibration begünstigt die Lenkreaktion in die kompatible Richtung. Es kann ein räumlicher SRC-Effekt in den Leistungsvariablen beobachtet werden.

H.SRC.2: Die semantische Anreicherung führt zur Umkehrung des SRC-Effekts.

6.1.2. Versuchsdesign und -ablauf

Allen Vpn wurden vorab ein Informationsblatt sowie ein Vorbefragungsbogen (Anhang B.1) übermittelt, in dem allgemeine Daten sowie Teilbefragungen zu verschiedenen Kontrollvariablen (KV) enthalten waren. Nach Ankunft der Vpn wurde deren Basisreaktionsleistung in einem Computereperiment ermittelt. Die Vpn nahmen anschließend die

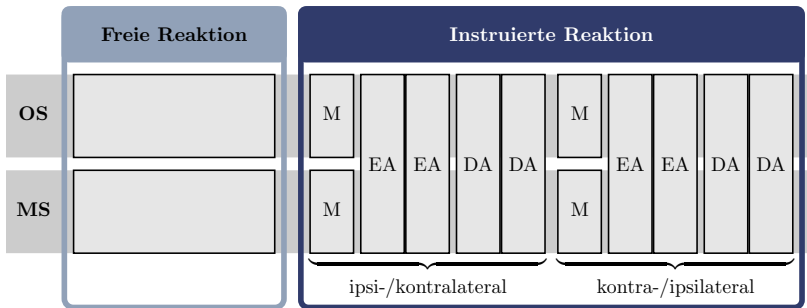


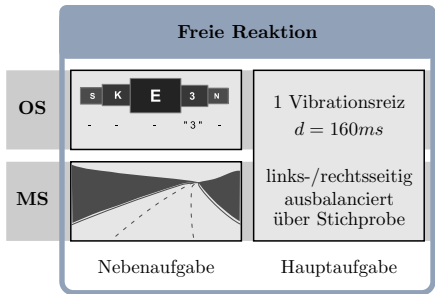
Abb. 6.1.: Versuchsablauf der SRC-Studie:

Der Versuch setzt sich aus den Phasen „Freie Reaktion“ und „Instruierte Reaktion“ zusammen (OS = Versuchsgruppe „Ohne Semantik“, MS = „Mit Semantik“, M = Manipulation, EA = Einzelaufgabe, DA = Doppelaufgabe, Details zu „Freie Reaktion“ s. Abb. 6.2, Details zur Manipulation s. Abb. 6.3).

Sitzeinstellung im Fahrsimulator vor. Sie wurden gebeten, eine beidhändige Lenkradhaltung in der „10-vor-2“-Position einzunehmen und während des gesamten Versuchs beizubehalten.

Der Versuch setzte sich aus den Hauptphasen „Freie Reaktion“ und „Instruierte Reaktion“ zusammen (s. Abb. 6.1). In der Phase der freien Reaktion wurde untersucht, ob eine einseitige Lenkradvibration eine unmittelbare und intuitive Reaktion in eine bestimmte Richtung hervorruft. In der Phase der instruierten Reaktion, die ein klassisches Wahl-Reaktions-Experiment darstellt, sollten vorhandene Reaktionsvorteile bei der Verwendung eines bestimmten Mappings aufgedeckt werden.

Es wurden die beiden experimentellen Gruppen „mit Semantik“ und „ohne Semantik“ unterschieden, die im weiteren Verlauf als MS bzw. OS bezeichnet werden. Zwischen diesen Gruppen bestanden Unterschiede hinsichtlich der Art der Nebenaufgabe in der Phase der freien Reaktion und hinsichtlich der Manipulation in der Phase der instruierten Reaktion, alle anderen Aufgaben waren identisch.

**Abb. 6.2: Freie Reaktion:**

Die Hauptaufgabe der Vpn in der Phase der freien Reaktion bestand darin, auf eine einseitige Lenkradvibration mit einer Lenkraddrehung zu reagieren. Die Nebenaufgaben unterschieden sich zwischen den Gruppen.

Versuchsphase „Freie Reaktion“

In der Phase der freien Reaktion wurden die Vpn instruiert, dass sie während der Bearbeitung einer Nebenaufgabe auf eine plötzlich auftretende Lenkradvibration mit einer unmittelbaren Lenkreaktion reagieren sollten (s. Abb. 6.2, *Hauptaufgabe*). Die Einseitigkeit der Vibration blieb unerwähnt. Die Richtung der Lenkreaktion sollte einen ersten Hinweis darauf geben, ob einseitige Lenkradvibrationen eine bestimmte Richtungstendenz aufgrund eines intuitiven Mappings anregen können.

Die Nebenaufgabe variierte zwischen den beiden Gruppen. Den Vpn in Gruppe OS wurden weiße Items (Buchstaben und Ziffern, Häufigkeit 11:1) auf schwarzem Hintergrund in der Mitte der Simulatorleinwand in kurzen zeitlichen Abständen ($\text{DoS}=160\text{ ms}$, $\text{ISI}=15\text{ ms}$) präsentiert. Sie sollten die Ziffern laut nennen und die Buchstaben ignorieren. Die Aufgabe lehnt sich an die RSVP-Aufgabe (*Rapid Serial Visual Presentation*) nach [HST05] an und wird trotz der notwendigen Anpassungen im weiteren Verlauf ebenfalls als RSVP-Aufgabe bezeichnet. Den Vpn in Gruppe MS wurde ein Fahrkontext vermittelt, indem sie als Nebenaufgabe auf einer dreispurigen Straße ohne Fremdverkehr mit 80 bis 100 km/h in der Mitte der mittleren Spur fahren sollten.

In beiden Gruppen wurde die Vibration mit einer Dauer von 160 ms nur einmal durch den Versuchsleiter ausgelöst, und die Versuchsphase wurde

nach der Stimulusdarbietung abgebrochen. Über die gesamte Stichprobe wurden links- und rechtsseitige Stimuli gleich häufig appliziert. Die Vpn sollten im Anschluss ihre Empfindung beschreiben und angeben, ob sie die Richtungsinformation wahrnehmen konnten. Sie sollten weiterhin ihre Reaktion verbalisieren und den Reiz hinsichtlich der Gefühlsdimensionen Valenz, Potenz und Erregung bewerten (s. Anhang B.1).

Studie SRC: Freie Reaktion

In der Phase der freien Reaktion sollten die Vpn auf eine einseitige Lenkradvibration mit einer unmittelbaren Lenkradddrehung reagieren. Die Vibration wurde nur einmal ausgegeben, und über deren Einseitigkeit wurde nicht informiert. Die Vpn in Gruppe OS erledigten parallel eine visuell-verbale Nebenaufgabe (RSVP-Aufgabe), die Vpn in Gruppe MS fuhren in einem simulierten Szenario.

Versuchsphase „Instruierte Reaktion“: Manipulation

In der Phase der instruierten Reaktion sollten die Vpn mit einem vorgegebenen Mapping auf einseitige Lenkradvibrationen reagieren. Alle Vpn absolvierten diese Phase mit beiden Mappings (s. Abb. 6.1), wobei die Reihenfolge über die Stichprobe ausbalanciert wurde. Das Mapping wurde jeweils vorab in einer Manipulationsphase präsentiert (s. Abb. 6.3).

Die Vpn der Gruppe OS wurden hierbei lediglich verbal über das zu verwendende Mapping instruiert. Die Vpn in Gruppe MS hatten die Möglichkeit, das Mapping in konformen Anwendungen im Fahr Simulator zu erleben. Für die kontralaterale Bedingung wurde ein LDWS implementiert, welches Vibrationen auf der Seite des drohenden Spurverlassens auslöst und damit ein Entgegenlenken bedingt. Für die ipsilaterale Zuordnung wurden die Vpn gebeten, einer weißen Linie in der Mitte der Spur zu folgen, die eine Optimaltrajektorie kennzeichnet. Ein Überfahren der Linie führt zu einer Vibration auf der Seite, in welche die Korrekturreaktion zu erfolgen hat. Im weiteren Verlauf werden die beiden Anwendungen auch als Szenario KON (kontralateral) bzw. Szenario

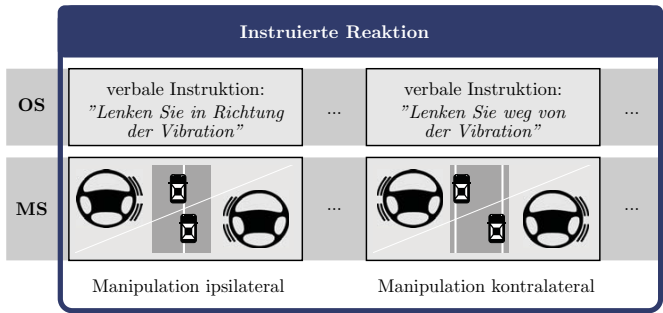


Abb. 6.3.: Manipulation:

In der Phase der Manipulation wird die zu verwendende Reiz-Reaktions-Zuordnung instruiert. Dies erfolgt in Gruppe OS durch verbale Instruktion und in Gruppe MS durch konforme Anwendungen der einseitigen Lenkradvibration in der Simulation (IPS-Szenario: „Folgen einer Optimaltrajektorie“ bzw. KON-Szenario: „Spurverlassenswarnung“).

IPS (ipsilateral) bezeichnet. Die Vpn in Gruppe MS hatten ausreichend Zeit Vibrationen aktiv auszulösen, indem sie das Fahrzeug in Richtung Spurrand bzw. weg von der Optimaltrajektorie steuerten.

Versuchsphase „Instruierte Reaktion“: Aufgabentypen

Nach der Manipulation folgten vier Blöcke à ca. 2 Min., in denen die Primäraufgabe der Vpn darin bestand, möglichst schnell und fehlerfrei entsprechend dem erlebten (Gruppe MS) bzw. instruierten (Gruppe OS) Mapping auf einseitige Lenkradvibrationen zu reagieren (s. Abb. 6.1). In jedem Block wurden 27 linksseitige und 27 rechtsseitige Vibrationsstimuli mit DoS=160 ms und ISI=1940 ms in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Zur Dämpfung des durch die Vibrationsmotoren erzeugten hörbaren Luftschalls trugen die Vpn während der Blöcke einen Kapselgehörschutz.

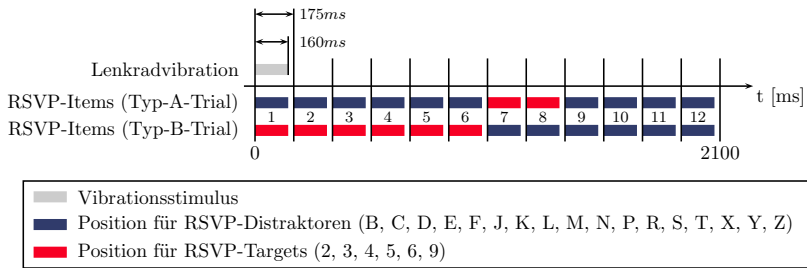


Abb. 6.4.: Schema eines Trials der Doppelaufgabe:

Die Primäraufgabe (Lenkreaktion auf einseitige Lenkradvibrationen) und die Sekundäraufgabe (RSVP-Aufgabe) teilen sich eine gemeinsame Zeitachse. Bei letzterer wird zwischen Typ-A- und Typ-B-Trials (Vermeidung der psychologischen Refraktärperiode nicht sichergestellt) unterschieden.

Während der ersten beiden Blöcke war diese Primäraufgabe die einzige Aufgabe der Vpn (Einzelaufgabenblöcke). Die Leinwand blieb während dieser Blöcke dunkel, und die Vpn konnten die Augen schließen und sich allein auf die Vibration konzentrieren. Zur Erhöhung der mentalen Belastung wurde die taktil-motorische Primäraufgabe im 3. und 4. Block mit der RSVP-Aufgabe als visuell-verbale Sekundäraufgabe kombiniert (Doppelaufgabenblöcke). Die Vpn wurden hierbei instruiert, die Priorität auf die Primäraufgabe zu setzen. Jeweils vor dem 1. und 3. Block konnten die Vpn Übungsdurchgänge absolvieren.

Bei den Doppelaufgabenblöcken teilen sich Primär- und Sekundäraufgabe die selbe Zeitachse (s. Abb. 6.4). Ein Trial stellt die kleinste Aufgabeneinheit dar und erfordert sowohl eine motorische Lenkreaktion auf einen Vibrationsstimulus als auch eine verbale Reaktion auf eine visuell dargebotene Zahl (RSVP-Targets, s. Abb. 6.4). Zusätzlich enthält ein Trial 11 unterschiedliche Buchstaben, die zufällig aus der Menge der 17 möglichen Buchstaben (RSVP-Distraktoren) gewählt werden und keine Reaktion der Vpn erfordern. Das Target und die 11 Distraktoren verteilen sich auf 12 mögliche zeitliche Positionen innerhalb eines Trials, womit dessen Gesamtdauer $12 \cdot 175 \text{ ms} = 2100 \text{ ms}$ beträgt.

Die Position des RSVP-Targets innerhalb eines Trials definiert dessen Typ. Bei Typ-A-Trials kann das Target nur an Position 7 oder 8, also 1050 ms bzw. 1225 ms nach Beginn der vibrotaktilem Reizung auftreten (rote Blöcke in Abb. 6.4). Diese Restriktion gilt als Maßnahme zur Vermeidung der psychologischen Refraktärperiode (PRP), die das Zeitintervall beschreibt, in welchem lediglich eine serielle Reizverarbeitung möglich ist ([Wel52]). Die RPR hängt von vielen Faktoren ab, so bspw. auch von den beanspruchten Modalitäten. Der vorliegenden Studie wird die konservative Einschätzung nach [BA01] zugrundegelegt, wonach die PRP bei relativ unkomplexen Aufgaben 800 ms nicht überschreitet.

Durch die bei Typ-A-Trials bestehende Fixierung auf ein Zeitschema entsteht eine Regelmäßigkeit, welche die Gefahr einer selektiven Aktivierung kognitiver Ressourcen birgt. Um dem entgegen zu wirken wurden Typ-B-Trials eingeführt, bei denen das Target eine der Positionen 1 bis 6 innerhalb eines Trials einnimmt (rote Blöcke in Abb. 6.4). Ein Doppelaufgabenblock besteht aus 48 Typ-A-Trials und 6 Typ-B-Trials in randomisierter Reihenfolge, und weist damit eine Gesamtdauer von $54 \cdot 2100 \text{ ms} = 113400 \text{ ms}$ auf. Die Targetpositionen innerhalb der Trials sind über den Aufgabenblock ausbalanciert, so dass je einmal jede der Positionen 1 bis 6 und je 24 mal die Positionen 7 und 8 durch ein Target eingenommen werden. Alle anderen Positionen werden zufällig mit Distraktoren belegt.

Nach jedem Block wurde die subjektive Anstrengungsempfindung auf einer psychometrischen Skala erhoben (s. Anhang B.1). Die Vpn in Gruppe MS wurden weiterhin gebeten, nach jedem zweiten Block die Präsenz des in der Phase der Manipulation erlebten Szenarios als Indikator für die Stärke der vorgegebenen semantischen Stimulusinterpretation anzugeben (s. Anhang B.1). Nach den jeweiligen Befragungen konnten die Vpn Pausen selbstbestimmter Dauer einlegen. Die Gesamtdauer eines Versuchs inkl. Pause lag zwischen 60 und 75 Min.

Studie SRC: Instruierte Reaktion

In der Phase der instruierten Reaktion sollten die Vpn möglichst schnell und fehlerfrei auf einseitige Lenkradvibrationen mit einem vorgegebenen Mapping reagieren. Die Vpn in Gruppe OS wurden verbal über das zu verwendende Mapping instruiert, die Vpn in Gruppe MS erlebten dieses in mappingskonformen Anwendungen in der Fahrsimulation. In jeweils 2 Einzelaufgabenblöcken à ca. 2 Min. ist die Lenkaufgabe (54 Stimuli, $d = 160$ ms, $ISI = 1940$ ms, links und rechts gleichverteilt und randomisiert) die einzige Aufgabe. In den darauf folgenden beiden Doppelaufgabenblöcken wurde die Lenkaufgabe mit der visuell-verbalen RSVP-Aufgabe kombiniert, wobei sich beide Aufgaben die selbe Zeitachse teilen. Alle Vpn führten die Aufgaben sowohl mit dem ipsilateralen als auch mit dem kontralateralen Mapping durch.

6.1.3. Versuchsplan

Durch die Kombination von Variationen der UV ergibt sich der Versuchsplan. Variiert wurde der Faktor **Mapping** (Reiz-Reaktions-Zuordnung) mit den Abstufungen „ipsilateral“ und „kontralateral“. Bezüglich des Mappings wurde ein within-subject Design gewählt, in dem jede Vp beide Faktorausprägungen erlebte. Weiterhin wurde der Faktor **Semantik** als between-subject Faktor mit den Abstufungen „mit Semantik“ und „ohne Semantik“ variiert (s. Abb. 6.5). Die dritte unabhängige Variable ist die **Aufgabenanforderung** mit den Abstufungen „niedrig“ (Einzelaufgabe) und „hoch“ (Doppelaufgabe), deren Reihenfolge über alle Vpn konstant war.

Effekte der Faktorvariationen wurden in den untersuchten AV erwartet. Es wurden die Lenkreaktionszeit (RT) und die Fehlerrate (Err_{steer}) bei der Primäraufgabe sowie die Fehlerrate (Err_{RSVP}) bei der Sekundäraufgabe als Leistungsdaten untersucht. Als Reaktion in der Primäraufgabe wird eine Lekkardrehung um mind. $\pm 8^\circ$ im Vergleich zum

		Reihenfolge der Mappings	
		zuerst ipsilateral	zuerst kontralateral
Semantik	mit	11	11
	ohne	11	11

Abb. 6.5.: Versuchsplan der SRC-Studie:

Die Untersuchungsbedingungen ergeben sich durch Kombination von Variationen der UV **Semantik** und **Mapping** (Reihenfolge). In jeder experimentellen Gruppe wurden 11 Vpn erhoben.

Lenkwinkel zum Zeitpunkt der Warmauslösung gefordert. Aus der Überschreitung dieser Schwelle wird die Reaktionszeit bestimmt, wobei lediglich Werte zwischen 100 und 1000 ms als valide betrachtet werden. Als Fehlreaktion werden sowohl ausbleibende als auch fälschlicherweise, d. h. unstimuliert ausgeführte motorische bzw. verbale Reaktionen gewertet. Weiterhin wurde die empfundene Anstrengung bei jedem Block über ein Fragebogeninstrument erhoben (Anhang B.1). Aus methodischen Gründen wurde die Basisreaktionsleistung der Vpn als KV erfasst. Weitere KV wurden mit dem Vorfragebogen sowie den Zwischenfragebögen zur affektiven Qualität des Stimulus und zur Präsenz der Szenarien (Anhang B.1) erhoben.

6.2. Ergebnisse

6.2.1. Stichprobenhomogenität

Am Versuch nahmen 44 Vpn (32 männlich, 12 weiblich) im Alter zwischen 27 und 40 Jahren ($M = 33,9$, $SD = 5,21$) teil. In Summe konnten 41 valide Datensätze erhoben werden (22 in Gruppe OS, 19 in Gruppe MS). Aufgrund technischer Probleme sowie auftretender Simulatorkrankheit waren die Daten von drei Vpn ungültig und wurden aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Für die valide Auswertung wird Homogenität der experimentellen Gruppen in Bezug auf relevante KV vorausgesetzt. In Anhang B.2.1 sind deskriptive Statistiken der betrachteten KV angegeben. Demnach sind Gruppenunterschiede hinsichtlich Altersstruktur, Fahrerfahrung, Fahrstil, Computererfahrung, Transfervermögen und Basisreaktionsleistung nicht in statistisch bedeutsamen Maßen¹ festzustellen. Ebenso ist das Geschlechterverhältnis beider Gruppen sehr ähnlich. Signifikante Unterschiede ergeben sich lediglich hinsichtlich der Händigkeitsverteilung. Über den Händigkeitsfragebogen konnten 2 Linkshänder identifiziert werden, die beide Gruppe MS zugeteilt wurden. Dennoch werden die Homogenitätsvoraussetzungen weitestgehend als erfüllt betrachtet.

6.2.2. Direktionalität und Neutralität der Stimuli

Auf Basis der Probandenäußerungen nach dem Erstkontakt mit der Lenkradvibration in der Phase der freien Reaktion kann die prinzipielle Eignung des mechanischen Aufbaus zur Übermittlung einseitiger Lenkradvibrationen festgestellt werden. Die Vpn konnten die aktiv vibrierende Seite lokalisieren und korrekt benennen, wenngleich die Vibration auch, jedoch deutlich vermindert, auf der passiven Seite spürbar war.

Um evtl. vorhandene Reaktionsvorteile für ipsi- bzw. kontralaterale Reaktionen zu unterbinden, die aus einer angenehm bzw. unangenehm empfundenen Vibration resultieren könnten, wurde auf eine affektiv neutrale Parametrierung der Stimuli geachtet. Nach dem Erstkontakt wurde die subjektive Empfindung der Vpn hinsichtlich der Gefühlsdimensionen Valenz, Erregung und Potenz mithilfe eines semantischen Differentials erhoben (Fragebogen und Ergebnisse s. Anhang B.1 bzw. B.2.2). Es kann festgestellt werden, dass die Bewertung hinsichtlich der drei Dimensionen neutral ausfällt. Affektive Neutralität als Voraussetzung für Hypothese H.SRC.1 kann damit als erfüllt angesehen werden.

¹Signifikanztest über t-Tests.

6.2.3. Ergebnisse der freien Reaktion

In der Phase der freien Reaktion wurden „spontane“ unkontingente Reaktionen auf einseitige Lenkradvibrationen erhoben. In Tabelle 6.1 sind die Richtungen dieser Reaktionen zusammengefasst. Das Lenkverhalten zeigt demnach keine Regelmäßigkeit, die Richtung der Reaktion scheint vielmehr zufällig gewählt zu werden. Die Händigkeit der Vpn hat ebensowenig einen systematischen Einfluss wie Richtungsinformationen, die aus dem Verlauf des Streckenabschnitts hervorgehen (Gruppe MS). Einige Vpn der Gruppe MS gaben an, infolge der Vibration nach Gefährdungen Ausschau gehalten zu haben, und, da keine Gefährdung vorlag, nicht bzw. verzögert reagiert zu haben.

6.2.4. Ergebnisse der instruierten Reaktion

Haupteffekt des Mappings

Auswirkungen der UV „Mapping“ lassen sich bei den Ausprägungen der AV feststellen. Über alle Aufgabenblöcke hinweg ergibt sich bei der Primäraufgabe ein Reaktionszeitvorteil von 14 ms bei ipsilateralem Mapping gegenüber kontralateralem Mapping (s. Abb. 6.6a). Über eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) kann die Signifikanz dieses Leistungsunterschieds nachgewiesen werden ($p < .003$). Mit 17 ms ergibt sich eine hoch signifikante Reaktionszeitdifferenz ($p < .001$) bei den

Tab. 6.1.: Richtung der freien Lenkreaktion

	n	ipsilateral	kontralateral	keine Reaktion
OS	22	11	11	0
MS	19	9	5	5
Σ	41	20	16	5

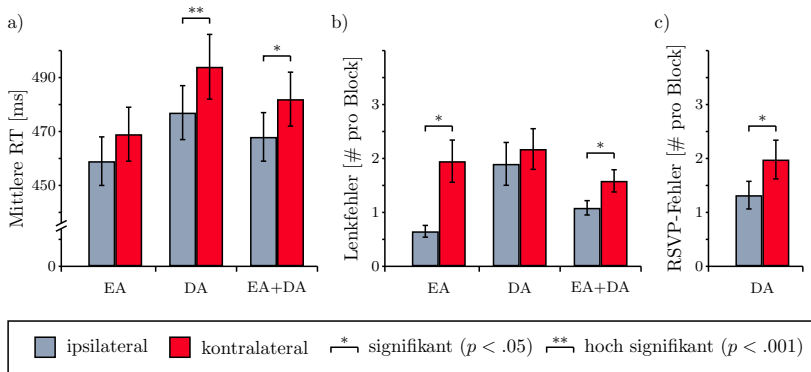


Abb. 6.6.: Haupteffekt des Mappings:

a) Effekt in der Reaktionszeit, b) Effekt in den Lenkfehlern, c) Effekt in den RSVP-Fehlern. Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardfehler (EA/DA = Einzel-/Doppelaufgabe).

Doppelaufgabenblöcken. Wenngleich die Reaktionen auch bei den Einzelaufgabenblöcken bei Verwendung des ipsilateralen Mappings schneller sind als bei Verwendung des kontralateralen Mappings, ist dieser Unterschied statistisch nicht belegbar ($p < .095$).

Vergleichbare Ergebnisse zeigt die Auswertung der Fehleranzahl (Anzahl der falschen oder ausbleibenden Lenkreaktionen, Abb. 6.6b). Insgesamt konnten nur sehr wenige Fehler beobachtet werden, deren Anzahl zwischen $M=0,65$ ($SD=0,49$) in der Einzelaufgabenbedingung mit ipsilateralem Mapping und $M=2,18$ ($SD=1,67$) in der Doppelaufgabenbedingung mit kontralateralem Mapping liegt. Über alle Aufgaben hinweg kann ein signifikanter Unterschied zugunsten des ipsilateralen Mappings festgestellt werden ($p < .005$), der hauptsächlich auf die signifikanten ($p < .003$) Unterschiede bei den Einzelaufgabenblöcken zurückzuführen ist, während der Unterschied bei den Doppelaufgabenblöcken statistisch nicht belegt werden kann ($p < .075$). Hypothese H.SRC.1 kann demnach angenommen werden. Ein SRC-Effekt mit Leistungsvorteilen des ipsilateralen Mappings kann hinsichtlich Lenkreaktionszeit sowie Lenkfehleranzahl festgestellt werden.

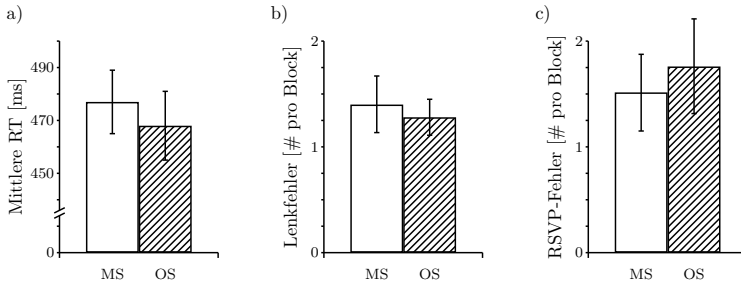


Abb. 6.7.: Haupteffekt der Semantik:

a) Effekt in der Reaktionszeit, b) Effekt in den Lenkfehlern, c) Effekt in den RSVP-Fehlern. Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardfehler.

Die Leistung in der Sekundäraufgabe ist vergleichbar mit der Leistung in der Primäraufgabe, mit $M=1,32$, $SD=1,64$ nicht oder falsch genannten RSVP-Targets bei ipsilateralem Mapping, und $M=1,98$, $SD=2,3$ bei kontralateralem Mapping (s. Abb. 6.6c). Auch diese Differenz erweist sich als statistisch signifikant ($p < .006$), so dass sich ein schwacher aber stabiler SRC-Effekt auch in der Sekundäraufgabe zeigt.

Haupteffekt der Semantik

Als alleiniger Faktor verursacht die semantische Anreicherung durch den zusätzlichen Fahrzeugkontext in Gruppe MS keine statistisch bedeutsamen Differenzen in den AV. Über Varianzanalysen kann gezeigt werden, dass die Zwischengruppeneffekte bzgl. der Lenkreaktionszeit, der Lenkfehleranzahl sowie der RSVP-Fehleranzahl deutlich unterhalb des Signifikanzniveaus liegen (s. Abb. 6.7).

Effekt der Interaktion von Mapping und Semantik

Wie beschrieben hat die Semantik als alleiniger Faktor keine messbare Wirkung auf die Leistungsvariablen. Betrachtet man diese jedoch im

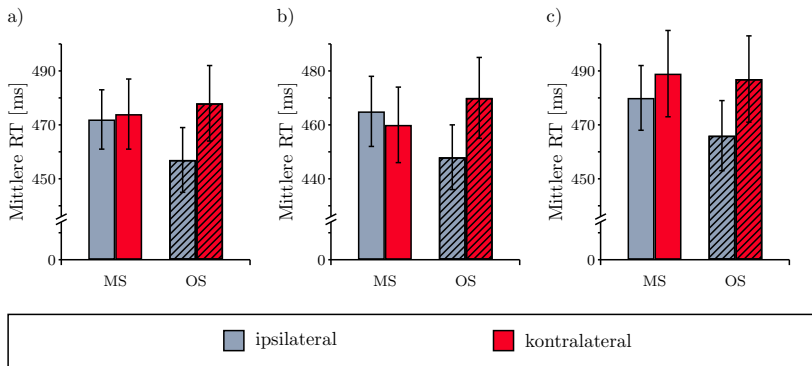


Abb. 6.8.: Interaktionseffekt von Mapping und Semantik:

a) alle Aufgaben, b) nur Einzelaufgaben, c) nur Doppelaufgaben.

Dargestellt sind jeweils Mittelwert und Standardfehler.

Zusammenhang mit dem Mapping, so kann tendenziell ein Interaktionseffekt beobachtet werden. Während die Lenkreaktionszeit bei Verwendung des kontralateralen Mappings über alle Aufgaben hinweg in beiden experimentellen Gruppen OS und MS auf etwa dem gleichen Leistungsniveau bleibt, erhöht sich diese durch die semantische Anreicherung in Gruppe MS bei ipsilateralen Reaktionen deutlich (s. Abb. 6.8a).

Bei genauer Betrachtung stellt man fest, dass dieser Interaktionseffekt auf die Einzelaufgabenbedingung zurückzuführen ist (s. Abb. 6.8b). Während hier in der Gruppe OS ein SRC-Effekt in der Lenkreaktionszeit beobachtet werden kann, zeigt sich eine Neutralisierung in Gruppe MS mit einem leichten Reaktionsvorteil bei kontralateralem Mapping im Vergleich zum ipsilateralen Mapping. In der Doppelaufgabenbedingung (s. Abb. 6.8c) bleibt der SRC-Effekt in beiden Gruppen erhalten. Über eine multifaktorielle Kovarianzanalyse mit den Hauptfaktoren Mapping und Semantik sowie der Kovariable Basisleistung wird die individuelle Grundreaktionszeit der Vpn auspartialisiert. Die Interaktion von Mapping und Semantik stellt sich dabei als signifikant heraus ($p < .022$).

6.2.5. Doppelaufgabeninterferenz

Zur Auflösung der Regelmäßigkeit im Zeitschema der Doppelaufgaben wurden Typ-B-Trials eingeführt (vgl. Abschnitt 6.1.2). Im weiteren Verlauf werden explizit die beiden Typ-B-Trials betrachtet, in denen das visuelle Target zur Auslösung einer verbalen Reaktion an den Positionen 1 oder 2 dargeboten wurde. Diese (quasi-)zeitgleiche Darbietung relevanter Reize in Primär- und Sekundäraufgabe sollte eine besonders starke Doppelaufgabeninterferenz verbunden mit einer Leistungsabnahme der Vpn verursachen. Der paarweise Vergleich mit t-Tests zeigt hingegen keine signifikante Erhöhung der Reaktionszeit. Im Gegenteil kann sogar eine tendenzielle Reduktion der Reaktionszeiten bei diesen Typ-B-Trials um bis zu 30 ms festgestellt werden ($p < .053$).

6.2.6. Subjektivurteile der Probanden

In der Nachbefragung konnten die Ergebnisse der Befragung zur subjektiven Empfindung bestätigt werden. Die meisten Vpn empfanden die Vibration als neutral bis eher angenehm. Die Stimuli wurden häufig als „unaufdringliche“, „ignorierbare“ Hinweise verstanden, die weder „störend“ noch „bedrohlich“ wirkten.

Bei der Frage nach der individuellen Strategie zur Bewältigung der Primäraufgabe wurden häufig simple motorische Strategien genannt. Demnach war die Strategie für das ipsilaterale Mapping zumeist ein „Ziehen mit der durch die Lenkradvibration aktivierten Hand“. Für das kontralaterale Mapping wurde neben der Strategie „Schieben mit der aktivierten Hand“ auch die Strategie „Ziehen mit der nicht aktivierten Hand“ geäußert. Letztgenannte Umcodierung der Aufgabe kann als Hinweis auf die Überlegenheit der motorischen Reaktion „Ziehen“ gesehen werden. Tatsächlich gaben einige Vpn an, dass ein „Ziehen“ am Lenkrad motorisch leichter fällt als ein „Schieben“.

Bei vielen Vpn in Gruppe OS² konnte die einseitige Lenkradvibration zu Fahrsituationen assoziiert werden. Häufige Assoziationen sind das „Überfahren von Spurmarkierungen“ oder „Rüttelstreifen“, oder das „Abkommen in den unbefestigten Spurrand“. Anzumerken ist, dass alle genannten Assoziationen Situationen beschreiben, die ein kontralaterales Reagieren der Fahrer notwendig machen. Dies kann erklären, warum das KON-Szenario zur Manipulation des kontralateralen Mappings von den Vpn als logischer empfunden wurde als das IPS-Szenario. Das KON-Szenario war nach Aussagen einiger Vpn „sehr hilfreich“, für andere aber auch „notwendig“ für die effektive Aufgabenbewältigung.

Weiterhin gaben einige Vpn an, die Primär- und Sekundäraufgaben in den Doppelaufgabenblöcken sehr gut voneinander „entkoppelt“ zu haben. Diese subjektive Einschätzung wird durch den nur sehr schwach ausgeprägten Rückgang der Reaktionsleistung in den objektiven Variablen untermauert.

6.3. Diskussion der Ergebnisse

6.3.1. Allgemeine Diskussion

Basierend auf dem Reaktionsverhalten der Vpn in der Phase der freien Reaktion wird festgestellt, dass eine einseitige Lenkradvibration keine unmittelbare Lenkreaktion auslöst. Reaktionen erfolgen bewusst und willkürlich, so dass der Fahrer zu keiner Zeit übersteuert wird. Die signalinhärente Richtungsinformation wird von den Vpn zwar erkannt, jedoch unterschiedlich interpretiert. Die einseitige Lenkradvibration ruft demnach keine interindividuell konstante Lenkreaktion hervor.

Allgemein konnte ein stabiler SRC-Effekt bei einseitigen vibrotaktilen Stimuli und Lenkreaktionen sowohl in den Leistungsvariablen der Primäraufgabe als auch der Sekundäraufgabe festgestellt werden, so dass

²Aufgrund der Konditionierung durch die semantische Anreicherung können „spontane“ Assoziationen in Gruppe MS nicht abgefragt werden.

Hypothese H.SRC.1 angenommen wird. Insbesondere auf Basis der subjektiven Äußerungen zu Handlungsstrategien wird vermutet, dass die mit der einseitigen Vibration einhergehende Aktivierung von nur einer Hand und die scheinbare motorische Überlegenheit des „Ziehens“ am Lenkrad über das „Schieben“ die Tendenz zu ipsilateralen Reaktionen begünstigt. Weiterhin wird angenommen, dass durch die affektive Neutralität der Vibrationsstimuli keine Reaktionsvorteile für eines der beiden Mappings im Sinne eines „Aufsuchens“ oder „Vermeidens“ der Vibration entstehen. Dennoch konnte in Gruppe MS in der Einzelaufgabenbedingung eine Erhöhung der Tendenz zu kontralateralen Reaktionen festgestellt werden, die zu einer Neutralisierung des SRC-Effekts führte. Der Grund hierfür wird im Fahrkontext gesehen.

Die RSVP-Aufgabe, deren intendierte ursprüngliche Funktion die Erhöhung der mentalen Belastung durch die Simulation der kognitiven Beanspruchung während des Autofahrens darstellte, führte effektiv dazu, dass die Vpn der Gruppe MS den während der Manipulation erlebten Fahrkontext nicht reaktivieren konnten. Dahingegen konnten sich die Vpn während den Einzelaufgabenblöcken mit geschlossenen Augen nach eigenen Angaben gut in den Fahrkontext hineinversetzen. Bestätigt wird dies durch die erhobene Präsenz des in der Manipulation erlebten Szenarios nach den Einzel- und Doppelaufgabenblöcken. Die höhere Präsenz der Manipulationsszenarien nach den Einzelaufgabenblöcken kann mithilfe eines Wilcoxon-Tests statistisch belegt werden ($p < .05$). Gleichzeitig erleben die Vpn der Gruppe OS zu keiner Zeit einen Fahrkontext. Es wird angenommen, dass der zusätzliche (bei den Einzelaufgaben mental präsente) Fahrkontext in Gruppe MS die Tendenz zu kontralateralen Reaktionen erhöht. Ein mögliches Erklärungsmodell liefert die in Abb. 6.9 dargestellte Assoziationskette. Demnach führt der im Fahrzeug allgemein vorherrschende Sicherheitsgedanke zu einer defensiven Verhaltenstendenz, wonach neue und unerwartete Reize eine Vermeidungsreaktion hervorrufen.

Die Neutralisation des SRC-Effekts bei den Einzelaufgabenblöcken in Gruppe MS kann auf eine leichte Reduktion der Reaktionszeiten bei Verwendung des kontralateralen Mappings zurückgeführt werden, viel-



Abb. 6.9.: Assoziationskette zur Wirkung der Semantik

mehr aber auf einen deutlichen Anstieg der Reaktionszeiten bei ipsilateralem Mapping. Diese Beobachtung kann mit der Aussage erklärt werden, dass der Fahrkontext die Tendenz zu kontralateralen Reaktionen erhöht. Demnach aktiviert das IPS-Szenario zwar einerseits die Assoziation „Trajektorienabweichung – Lenken in Richtung der Vibration“ und begünstigt damit ipsilaterale Reaktionen, macht andererseits aber zur gleichen Zeit den Fahrkontext und damit die Assoziation „Signal – Vermeiden“ präsent. Da beide Assoziationen gegenseitig inhibierend wirken, wird ein zusätzlicher Konflikt erzeugt, der die Reaktionsleistung beeinträchtigt. Dahingegen ist das Mapping der durch das KON-Szenario aktivierten Assoziation konsistent mit der „kontralateralen“ Assoziation, die im Fahrkontext begründet ist, woraus geringe Reaktionsvorteile entstehen.

Die Aussagen der Vpn in Gruppe OS sprechen für diesen Schluss. Es konnten lediglich solche Fahrsituationen assoziiert werden, die ein kontralaterales Reagieren bedingen. Während in der abstrakten Umgebung ein SRC-Effekt mit Reaktionsvorteilen für das ipsilaterale Mapping beobachtet werden konnte, scheinen kontralaterale Reaktionen im Fahrzeugumfeld logischer zu sein. Hypothese H.SRC.2 wird demnach teilweise bestätigt. Die semantische Anreicherung kann zumindest tendenziell zu einer Umkehrung des SRC-Effekts führen, sofern durch die Anreicherung ein kontralaterales Mapping codiert wird.

6.3.2. Diskussion der Methoden

In der Nachbetrachtung muss zunächst ein methodischer Mangel festgestellt werden. Bei der Instruktion der Vpn in der Phase der freien Reaktion wurde das Ausmaß der notwendigen Reaktion am Lenkrad durch den Versuchsleiter demonstriert. Dabei wurde nicht sichergestellt, dass die Reaktionsrichtung variiert bzw. beide Richtungen demonstriert wurden, so dass ein Einfluss der Demonstration auf die Richtungsentscheidung der Vpn nicht ausgeschlossen werden kann. Dies hat jedoch keine Auswirkung auf die Feststellung, dass einseitige Lenkradvibrationen keine unmittelbaren Lenkreaktionen bewirken.

Der Fahrsimulator als experimentelle Umgebung der Studie macht einen Fahrkontext unmittelbar präsent, was einerseits vorteilhaft für Gruppe MS ist, andererseits aber nachteilig bzgl. der gewünschten (Fahr-) Kontextfreiheit in Gruppe OS wirkt. Offensichtlich kann die aus methodischer Sicht angestrebte Kontextfreiheit in einem Fahrsimulator nicht erreicht werden. Aus diesem Grund ist die Bezeichnung „Fahrkontext“ bzw. „Semantik“ als relatives Maß zu verstehen. Die durch die Nutzung des Fahrsimulators entstandenen Vorteile, insbesondere die Verwendung vorhandener Strukturen zur Datenaufzeichnung, überwiegen diesen Nachteil jedoch. Darüberhinaus ermöglicht erst die Nutzung des Fahrsimulators die Vergleichbarkeit der experimentellen Gruppen, da lediglich die Nebenaufgabe in der Phase der freien Reaktion sowie die Manipulation in der instruierten Reaktion variiert wurden.

Reaktionen können beschleunigt werden, wenn die Vpn eine visuelle Rückmeldung ihrer Reaktion erhalten ([PWP04]). In der vorliegenden Studie wurde zu diesem Zweck ursprünglich ein Cursor auf der Simulatorleinwand vorgesehen, dessen laterale Position an den Lenkwinkel gekoppelt ist. Aufgrund technischer Einschränkungen bewegte sich der Cursor nicht flüssig und wirkte mehr störend als unterstützend, so dass er nach den Vorversuchen wieder entfernt wurde. Die geringe Ausprägung des SRC-Effekts kann zumindest teilweise auf das fehlende visuelle Feedback zurückgeführt werden.

Sowohl im KON- als auch im IPS-Szenario wurde durch die Vibration die selbe semantische Bedeutung des Überfahrens einer Markierung auf der Spur codiert. Relevant für die Handlung ist jedoch die pragmatische Interpretation des Signals durch den Empfänger. Die Verwendung des Begriffs „Semantik“ in der vorliegenden Studie ist deshalb suboptimal, da neben der semantischen Anreicherung eine „pragmatische Anreicherung“ stattfindet (vgl. Erläuterung der Begriffe „Semantik“ und „Pragmatik“ in Abschnitt 3.3.1). Während die Vibration beim KON-Szenario vor einer bedrohlichen Situation warnt, informiert sie im IPS-Szenario lediglich über ein vergleichsweise harmloses Abweichen von einem Optimalzustand. Dadurch kann erklärt werden, warum das KON-Szenario Reaktionen beschleunigen kann, während das IPS-Szenario keinen vergleichbaren Effekt hat.

Es stellt sich als schwierig heraus, für das ipsilaterale Mapping ein zum KON-Szenario semantisch und pragmatisch vergleichbares Szenario zu finden. Diese fehlende Vergleichbarkeit muss einerseits als methodische Einschränkung hingenommen werden, dient andererseits aber als weiterer Hinweis auf die Dominanz des kontralateralen Mappings im Kontext des Autofahrens.

6.4. Empfehlungen für einseitige Lenkradvibrationen

Für den Einsatz im Fahrzeug ist eine Entscheidung hinsichtlich der zugrundezulegenden Reiz-Reaktions-Zuordnung bei Stimulation mit einseitigen Lenkradvibrationen erforderlich. Diese lösen keine unmittelbaren oder reflexartigen Lenkreaktionen in eine spezifische Richtung aus. Um dennoch reliable Reaktionen zu bewirken, muss sichergestellt werden, dass die Stimuli von den Fahrern mit hoher Übereinstimmung gleich interpretiert werden. Vorteile sollten sich dann ergeben, wenn das Signal ohne weitere Instruktion die richtige Interpretation suggeriert, indem es bei den Fahrern eine adäquate Assoziation hervorruft.

In der Simulatorstudie konnte ein SRC-Effekt für einseitige vibrotaktile Stimuli und Lenkreaktionen festgestellt werden, nach dem Reaktionen in

Richtung der Reize schneller und fehlerfreier ausgeführt werden können als Reaktionen in die entgegengesetzte Richtung. Vergleichbare Studien mit einseitigen akustischen Reizen ([Gui83], [PWP04], [WPP03a]) legen den Schluss nahe, dass dieser Effekt nicht rein motorisch bedingt ist, wohl aber durch motorische Gegebenheiten begünstigt wird.

Weder durch eigene Recherchen noch auf Basis der Probandenäußerungen konnten Assoziationen zu der einseitigen Lenkradvibration gefunden werden, die eine ipsilaterale Reiz-Reaktions-Zuordnung vermitteln. Dem in der vorliegenden Studie eingesetzten IPS-Szenario mangelt es nicht zuletzt deshalb an praktischer Relevanz, da die Markierung einer Optimaltrajektorie in der Realität nicht existiert. Dennoch ist die Vibration in der Lage, diese Assoziation des Überfahrens einer Spurmarkierung bei unkonditionierten Fahrern hervorzurufen. Damit eignet sich das Signal zur verständlichen Übermittlung einer Warnung bei drohender Spurverlassensgefahr, zu dessen Zweck es ursprünglich entworfen wurde.

Die kontralaterale Zuordnung des „Weglenkens“ erscheint im Kontext des Autofahrens logischer. In der Studie konnte nachgewiesen werden, dass die aus räumlichen und motorischen Eigenschaften resultierenden Vorteile des ipsilateralen Mappings durch die kontralaterale semantische Definition neutralisiert und tendenziell umgekehrt wurden. Für die Anwendung im Fahrzeug wird aus diesen Gründen das kontralaterale Mapping empfohlen. Haupthypothese H.SRC wird nicht abgelehnt.

Die Lenkradvibration wurde in der vorliegenden Studie als neutral empfunden. Durch Variation der Vibrationsparameter können „härtere“ Vibrationen erzeugt werden, wobei angenommen wird, dass dies die kontralaterale Handlungstendenz verstärkt. Durch die Wahl der Vibrationsaktuatorik sowie deren Versorgungsspannung können Frequenz und Amplitude der Vibration beeinflusst werden. Wie in der Untersuchung zur Interpretation von Lenkradvibrationen (Abschnitt 3.4.2) gezeigt werden konnte, steigt in einem gewissen Bereich auch mit zunehmender Vibrationsdauer die empfundene Intensität, wobei die Dauer von 160 ms in der vorliegenden Studie als kurz einzustufen ist. Weiterhin ist vorstellbar, durch temporale Darbietungsmuster, wie z.B. gepulste Vibrationen, eine

kontralaterale Reaktion zu begünstigen. Diese Fragen können im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig geklärt werden, sollten jedoch bei einer konkreten Produktauslegung in Betracht gezogen werden.

Zusammenfassung der Hypothesen und Ergebnisse

H.SRC: Einseitige Lenkradvibrationen werden im Fzg. zweckmäßig mit einer kontralateralen Reiz-Reaktions-Zuordnung eingesetzt.

- .1:** Eine als neutral empfundene einseitige Lenkradvibration begünstigt die Lenkreaktion in die kompatible Richtung. Es kann ein räumlicher SRC-Effekt in den Leistungsvariablen beobachtet werden.
- .2:** Die semantische Anreicherung führt zur Umkehrung des SRC-Effekts.

Die Haupthypothese H.SRC wird bestätigt. Während ipsilaterale Reaktionen in einer abstrakten Umgebung zu besseren Reaktionsleistungen führen, ist das kontralaterale Mapping im Fahrzeugkontext logischer. Für die Anwendung im Fahrzeugkontext wird die kontralaterale Reiz-Reaktions-Zuordnung empfohlen.

Hypothese H.SRC.1 wird angenommen. Es konnte ein stabiler SRC-Effekt bei einseitigen Vibrationsstimuli und Lenkreaktionen in Primär- und Sekundäraufgabe festgestellt werden. Hypothese H.SRC.2 wird teilweise bestätigt; die semantische Anreicherung führte tendenziell zu einer Umkehrung des SRC-Effektes.

7. Haptische Spurverlassenswarnung

„Die einseitige Lenkradvibration wird als Spurverlassenswarnsignal subjektiv präferiert.“

(Haupthypothese H.LDW)

7.1. Einführung und Methodik

7.1.1. Motivation, Fragestellungen und Hypothesen

Basierend auf der Analyse des Standes der Technik zu haptischen Spurverlassenswarnsignalen (s. Abschnitt 3.1.2) wurde die Annahme formuliert, dass ein aus Nutzersicht geeignetes Signal ein Vibrieren oder Rütteln am Lenkrad mit einer Richtungsinformation kombiniert. Unter dieser Annahme erscheint der Einsatz einer einseitigen Lenkradvibration zweckmäßig. Es wird davon ausgegangen, dass die Vibration die Assoziation des Überfahrens einer (strukturierten) Spurmarkierung hervorrufen kann. Damit kann das Signal bei der Situationsinterpretation, und aufgrund der enthaltenen Richtungsinformation auch bei der Handlungsplanung unterstützen. Die Nutzung dieser Assoziation bedingt eine kontralaterale Anwendung einseitiger Lenkradvibrationen, was durch die in Kapitel 6 beschriebene SRC-Studie legitimiert werden konnte.

Um die hypothetisierten Anforderungen an eine haptische Spurverlassenswarnung am Lenkrad zu prüfen und eine Nutzerbewertung verschiedener Signale zu ermöglichen, wurde eine Simulatorstudie durchgeführt. Neben der einseitigen Lenkradvibration wurde eine nondirektionale Lenkradvibration durch die simultane Ansteuerung beider Lenkradseiten realisiert. Zusätzlich zu diesen rein taktilen Signalen wurden ein gerichtetes Lenkmoment, ein Lenkradrütteln sowie ein Rütteln mit

überlagertem Richtungsmoment untersucht (vgl. Abb. 3.2, S. 22). Als weiteres Signal wurde die nondirektionale (taktile) Lenkradvibration mit einem Richtungsmoment überlagert (s. Tab. 7.1).

Unter der Annahme, dass die Wirksamkeit eines haptischen Spurverlassenswarnsignals auch und evtl. primär auf der durch das Signal vermittelten Bedeutung beruht, ergeben sich neben der zu Beginn dieses Kapitels angeführten Haupthypothese folgende Unterhypothesen:

H.LDW.1a: Die (nondirektionale) Lenkradvibration und das (nondirektionale) Lenkradrütteln werden mit Spurverlassen assoziiert.

H.LDW.1b: Einseitige Lenkradvibrationen werden ebenso mit Spurverlassen assoziiert.

H.LDW.1c: Durch die Überlagerung der Lenkradvibration bzw. des Lenkradrüttelns mit einem Richtungsmoment wird die Assoziation zu Spurverlassen abgeschwächt.

Tab. 7.1.: Übersicht der haptischen Signale

Nr.	Name	Beschreibung
[H1]	Lenkmoment	Ruckartig appliziertes Moment in Richtung des notwendigen Lenkeingriffs.
[H2]	Lenkradrütteln	Rütteln, das durch Lenkmomente gleicher Stärke erzeugt wird, die in alternierender Richtung appliziert werden.
[H3]	Lenkradrütteln mit Richtungsmoment	Überlagerung des Lenkradrüttelns [H2] mit einem gerichteten Moment zur Übermittlung einer Richtungsinformation.
[H4]	Lenkradvibration	Durch Unwuchtmotoren erzeugte Vibration auf beiden Seiten des Lenkrads.
[H5]	einseitige Lenkradvibration	Durch Unwuchtmotoren erzeugte Vibration auf einer Seite des Lenkrads.
[H6]	Lenkradvibration mit Richtungsmoment	Überlagerung der Lenkradvibration [H4] mit einem gerichteten Moment zur Übermittlung einer Richtungsinformation.

Bezüglich der Notwendigkeit zur haptischen Übermittlung einer Richtungsinformation wird hypothesisiert:

H.LDW.2: Direktionale Warnsignale werden den entsprechenden non-direktionalen Ausprägungen der Warnsignale aufgrund der zusätzlichen Richtungsinformation vorgezogen.

Auf 1000 km Autofahrt warnt ein LDWS im Schnitt 50 bis 80 Mal (alle 12,5 bis 20 km, [Bre09]), so dass mit vielen subjektiv als unnötig wahrgenommenen Warnungen zu rechnen ist. Dementsprechend wird eine gewisse „Fehlertoleranz“ der Fahrer gewünscht.

H.LDW.3a: Propriozeptive Signale wirken aufdringlicher als taktile Signale.

H.LDW.3b: Je aufdringlicher ein Signal, desto weniger subjektiv unnötige Warnungen werden toleriert.

H.LDW.3c: Je aufdringlicher ein Signal, desto eher wird das System deaktiviert.

H.LDW.3d: Je aufdringlicher ein Signal, als desto ungeeigneter wird es bewertet.

7.1.2. Vorstudie zur Optimierung der Signale

Die durch die Unwuchtmotoren erzeugten Vibrationen werden durch die Versorgungsspannung bestimmt. Diese beeinflusst gleichermaßen die Vibrationsfrequenz und deren Intensität (Beschleunigung), welche zudem über die Anzahl der aktiven Vibrationsmotoren je Seite diskret variiert werden kann. Die Einstellungen der SRC-Studie (Kap. 6) werden beibehalten, wodurch gut wahrnehmbare und - im Falle der einseitigen Reizung - diskriminierbare Lenkradvibrationen erzeugt werden.

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wurden die lenkmomentbasierten Warnsignale ([H1]-[H3], [H6], s. Tab. 7.1) in einer Vorstudie für die Funktion LDW optimiert. Dazu parametrisierten 11 Vpn (10 männlich,

1 weiblich, 3 wurden aufgrund ihrer Tätigkeit als Experten eingestuft) die Warnsignale nach ihren subjektiven Präferenzen. Die Vpn fuhren dazu auf einem simulierten geraden, seitlich durch Spurmarkierungen begrenzten Streckenabschnitt ohne Fremdverkehr. Sie lösten Warngaben aktiv durch Steuern des Fahrzeugs in Richtung Spurrand aus. Über den Touchscreen konnten die Vpn zwischen den 4 Signalen auswählen und deren Parameter ändern. Zur Warngabe wurde der RBS-Ansatz herangezogen (vgl. Abschnitt 3.1.2). Die Vpn sollten bei ihren Einstellungen u. a. auch bedenken, wie das Signal bei unerwarteter Darbietung, bspw. bei abgelenktem Fahren wirkt. Die Instruktionen der Vorstudie sind in Anhang C.1 zu finden.

Die einzustellenden Signalparameter sind in Abb. 7.1 dargestellt. So konnten die Vpn bei den Signalen [H1], [H3] und [H6] jeweils die Stärke M_{dir} des Richtungsmoments variieren. Bei den beiden Lenkradrüttelsignalen [H2] und [H3] konnten sowohl die Stärke M_R des Rüttelmoments als auch die Frequenz f des Rüttelns angepasst werden. Außerdem konnten die Vpn eine konstante Warndauer Δt vorgeben oder die Option einer situativen Warndauer wählen, bei der das Warnsignal abhängig von der Fahrerreaktion während der Dauer des Spurverlassens aktiv war. Die Signale wurden jeweils sprungförmig appliziert, so dass bspw. die Anstiegssteilheit des Lenkmoments lediglich durch das Übertragungsverhalten der Lenkanlage bestimmt wurde und nicht anpassbar war.

Auf dem Touchscreen wurden keine Absolutwerte der Signalparameter angezeigt, sondern lediglich Richtungspfeile zur Verstärkung bzw. Abschwächung der Parameter. Alle Einstellungen sollten zweimal durchgeführt werden. Zunächst wurde das simulierte fahrtinduzierte Lenkmoment der Reifen-Fahrbahn-Interaktion deaktiviert, so dass die Warnmomente die einzigen am Lenkrad wirksamen systemgenerierten Momente darstellten (Bedingung „ohne Rückstellmoment“). Im zweiten Durchgang wurden den Warnmomenten fahrtinduzierte Lenkmomente überlagert, wobei aus Gründen der Varianzreduktion eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h zur Berechnung dieser Momente angesetzt wurde (Bedingung „mit Rückstellmoment“). Die Reihenfolge der Bedingungen wurde über die Vpn variiert.

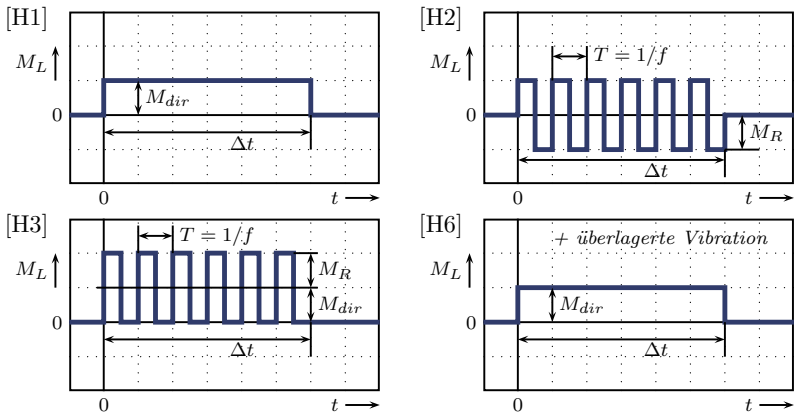


Abb. 7.1.: Einzustellende Signalparameter:

Schematische Darstellung der applizierten Lenkmomente am Beispiel eines Spurverlassens nach rechts zum Zeitpunkt $t = 0$ (M_L = Lenkmoment, M_{dir} = Richtungsmoment, M_R = Rüttelmoment, f = Frequenz, Δt = Warndauer).

Abb. 7.2 zeigt Boxplots der eingestellten Signalparameter in der Bedingung „ohne Rückstellmoment“. Unter der Bedingung „mit Rückstellmoment“ wurden von den Vpn stärkere Momente gewählt, mutmaßlich zur Gewährleistung der Detektierbarkeit der synthetischen Information. Bei M_{dir} beträgt die Differenz in etwa 0,5 Nm, M_R wird bei zusätzlichem Rückstellmoment durchgängig um ca. 0,15 Nm stärker eingestellt. Für die Hauptstudie werden jeweils die Median-Werte verwendet. Bei der Warndauer wurde zu 88% die Einstellung „Warnung für Spurverlassensdauer“ gewählt. Wurde eine feste Warndauer gewünscht, so lag diese zwischen 500 und 2000 ms.

In einem abschließenden Fragebogen (Anhang C.1) wurden zusätzlich allgemeine Eigenschaften geeigneter sowie ungeeigneter LDW-Signalen erhoben. 5 der 11 Vpn gaben an, dass das Warnsignal zu einem intuitiven Verständnis bzw. zur korrekten Interpretation der übermittelten Botschaft führen solle. Das Signal sollte deutlich als Warnsignal erkannt

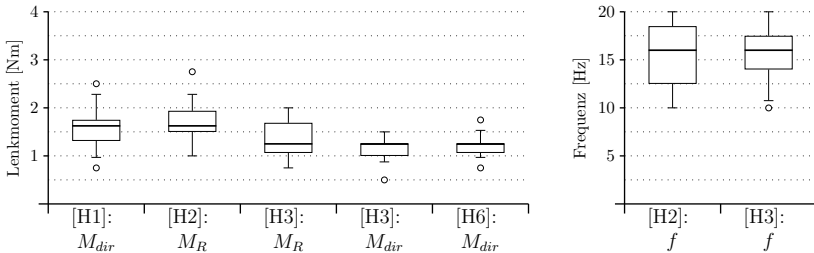


Abb. 7.2.: Boxplots der eingestellten Signalparameter:

Versuchsbedingung „ohne Rückstellmoment“. Die Box ist der durch das obere und untere Quartil begrenzte Bereich der mittleren 50% der Daten. In dieser Box ist der Median hervorgehoben. Werte außerhalb der Box werden durch die Whisker dargestellt. Diese reichen bis zu den Extremwerten, ihre Länge ist jedoch maximal auf den 1,5-fachen Interquartilsabstand beschränkt. Werte außerhalb der Whisker werden durch Kreise markiert und in der Literatur häufig als Ausreißer behandelt.

werden und sich merklich von natürlichen Straßeneinflüssen abheben. 5 Vpn gaben an, dass das Warnsignal eine Richtungsinformation enthalten sollte. Bezüglich der Signalstärke sollte das Signal nach Aussage von 5 Vpn stark genug sein, um zumindest aufzufallen. 7 Vpn äußerten Bedenken bei zu starken Signalen, die aufdringlich bzw. nervig (2 Vpn), unkontrollierbar (3) oder erschreckend (4) sein könnten.

7.1.3. Versuchsdesign und -ablauf

Der Versuch setzte sich aus den Hauptphasen „Interpretation der haptischen Anregung“ (kurz „Interpretation“) und „Anwendung in der Funktion LDW“ (kurz „Anwendung“) zusammen, die von Vor-, Zwischen- und Nachbefragungen begleitet wurden (vgl. Abb. 7.3). Den Vpn wurden vorab ein Informationsbogen und die Einwilligungserklärung übermittelt. Zudem wurden in einen Vorfragebogen demografische Daten sowie Fahrerfahrung, Fahrstil und Händigkeit als KV erhoben. Nach

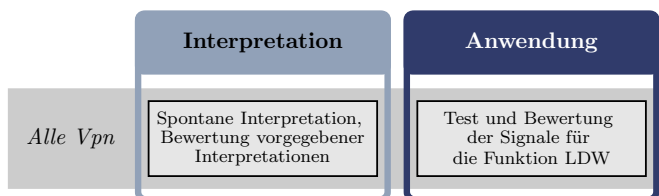


Abb. 7.3.: Versuchsablauf der LDW-Studie:

Der Versuch setzte sich aus den Hauptphasen „Interpretation der haptischen Anregung“ und „Anwendung in der Funktion LDW“ zusammen (Details s. Abb. 7.4 und 7.5).

Ankunft der Vpn wurden diese in den Fahrsimulator gebeten, wo sie die Sitzeinstellungen vornahmen. Sie wurden instruiert, während des gesamten Versuchs eine beidhändige Lenkradhaltung beizubehalten.

Versuchsphase „Interpretation“

In der Phase „Interpretation“ wurde untersucht, welche Assoziationen die haptischen Signale bei den Vpn hervorrufen. Die Signale wurden dazu als natürliche Anregungen deklariert, die durch normales Fahren hervorgerufen werden können. Die Vpn spürten zunächst jede haptische Anregung nacheinander (randomisierte Reihenfolge) und wurden gebeten, ihre Spontanassoziationen zu Situationen im Fahrzeugkontext zu nennen, sowie Bezeichnungen für die Anregungen zu wählen.

Im Anschluss sollten die Vpn beurteilen, wie gut die haptischen Anregungen mit den Anregungen übereinstimmen, die sich die Vpn in vorgegebenen Fahrsituationen vorstellen (s. Abb. 7.4). Die Präsentation der Fahrsituationen erfolgte durch einen Beschreibungstext sowie eine beispielhafte Illustration der entsprechenden Situation, wobei die Vpn gebeten wurden, dem Text mehr Bedeutung beizumessen, und die bildliche Darstellung idealerweise durch ein eigenes Bild der Situation zu ersetzen. Es wurden 10 unterschiedliche Fahrsituationen [S1] bis [S10]

untersucht (vgl. Tab 7.2). Von besonderer Bedeutung im Rahmen dieser Arbeit sind insbesondere die Fahrsituationen [S6] bis [S8], die ein drohendes Spurverlassen beschreiben.

Zunächst wurden alle Fahrsituationen [S1] bis [S10] durch den Versuchsleiter präsentiert und nach Rückfragen erläutert. Im Anschluss spürten die Vpn die haptischen Signale am Lenkrad bei gleichzeitiger visueller Präsentation der Fahrsituationen und sollten daraufhin bewerten, wie gut diese zusammenpassen¹. Die Bewertung erfolgte über eine grafische Benutzeroberfläche auf dem Touchscreen im Mock-up. Auf diesem hatten die Vpn zudem die Möglichkeit anzugeben, wenn die Fahrsituation nicht bekannt war. Weiterhin konnte das haptische Signal über den Touchscreen jederzeit erneut ausgegeben werden.

Nach einer selbstbestimmten Anzahl von Übungsdurchgängen mit Begleitung durch den Versuchsleiter, in denen eine zufällige Kombination aus Fahrsituation und haptischem Signal präsentiert und bewertet wurde, starteten die Experimentaldurchgänge. Jede Vpn bewertete die Übereinstimmung jedes Signals mit allen 10 Situationen in randomisierter Reihenfolge. Nach jeweils 15, 30 sowie 45 Bewertungen wurden die Vpn über die Simulatorleinwand auf die Möglichkeit zum Einlegen einer

¹Ein vergleichbares Vorgehen ist in [GW05a], [GW05b] beschrieben.

Tab. 7.2.: Fahrsituationen in der Phase „Interpretation“

Nr.	Name	Beschreibung
[S1]	BAB Platten	Fahrt über Autobahn in Plattenbauweise
[S2]	Kopfsteinpflaster	Fahrt über Kopfsteinpflaster
[S3]	Platter Reifen	Fahrt mit einem platten Vorderreifen
[S4]	Bahnschiene	Fahrt über eingelassene Bahnschiene
[S5]	Schlagloch	Fahrt mit dem Vorderrad durch ein Schlagloch
[S6]	Spurmarkierung	Fahrt über strukturierte Spurmarkierung rechts
[S7]	Nagelband	Fahrt über Rüttelstreifen rechts
[S8]	Spurrand	Abkommen in den rechten unbefestigten Rand
[S9]	Bordstein	Kontakt mit Bordstein rechts
[S10]	Seitenwind	Versatz durch Seitenwind nach links

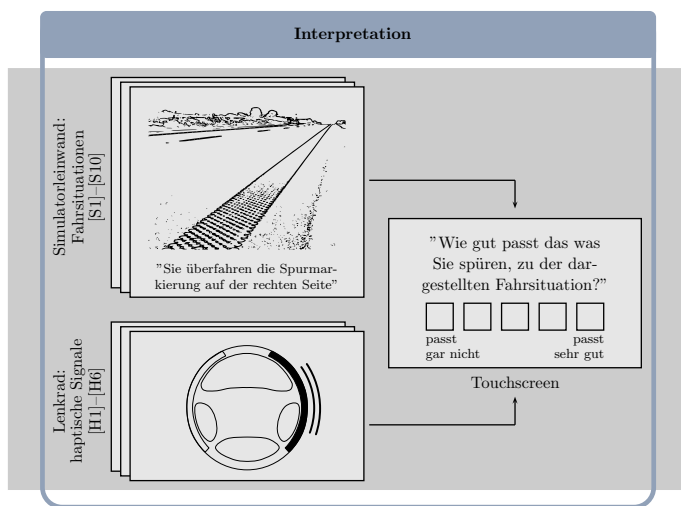


Abb. 7.4.: Versuchsphase „Interpretation“:

In der Phase der Interpretation sollten die Vpn u. a. bewerten, wie gut eine haptische Anregung mit der angenommenen Anregung in einer vorgegebenen Fahrsituation übereinstimmt. Diese „Assoziationsstärke“ wurde für alle Kombinationen der 10 Fahrsituationen mit den 6 haptischen Signalen mithilfe einer 5-stufigen Likert-Skala erhoben. Dargestellt ist beispielhaft die Situation „Spurmarmarkierung“ und das Signal „einseitige Lenkradvibration“.

Pause hingewiesen, die durch Quittierung auf dem Touchscreen beendet werden konnte. Während des gesamten Versuchs wurden die Vpn gebeten, einen Hörschutz zu tragen. Für die Bewertung der 60 Kombinationen benötigten die Vpn 10 bis 12 Minuten.

Nach der Bewertung wurden die Vpn an einen Tisch im Versuchsraum gebeten, an dem sie einen Fragebogen zur Befindlichkeit ausfüllen sollten (Anhang C.1). Die Signale wurden im Anschluss mit den Vpn besprochen, wobei die von den Vpn zu Beginn gewählten Bezeichnungen verwendet wurden, und sollten dann bezüglich verschiedener Kategori-

en (u. a. “Bedrohlichkeit“) in eine Rangordnung gebracht werden. Diese Bewertung diente lediglich der Beschäftigung der Vpn während notwendiger Versuchskonfigurationen und wurde nicht ausgewertet.

Studie LDW: Interpretation

In der Phase „Interpretation“ sollten die Vpn bei verschiedenen haptischen Anregungen am Lenkrad bewerten, wie gut diese mit den angenommenen Anregungen in bestimmten, auf der Leinwand beschriebenen und visualisierten Fahrsituationen übereinstimmen.

Versuchsphase „Anwendung“

In der Phase „Anwendung“ wurden die Vpn instruiert, dass es sich bei den haptischen Signalen um synthetisch erzeugte Warnsignale handelt, die vom Fahrzeug in bestimmten Situationen ausgegeben werden. Sie sollten daraufhin potentielle Anwendungsgebiete haptischer Warnsignale in der Lenkung nennen. Im weiteren Verlauf wurde der Anwendungsfall LDW vorgestellt und die Vpn wurden zur Bewertung der haptischen Signale für diese Anwendung wieder in den Simulator gebeten. Die Warnsignale wurden nacheinander durch die Vpn über den Touchscreen aktiviert, wobei die Reihenfolge der randomisierten Reihenfolge bei der Erstdarbietung der Signale entsprach. Die Vpn fuhren auf einer geraden Strecke ohne Fremdverkehr und provozierten Warnereignisse gezielt durch Lenken in Richtung des Spurrandes. Nachdem sie ein Warnsignal nach eigener Meinung ausgiebig getestet hatten, beantworteten sie verschiedene Fragen zu dem Signal über den Touchscreen, bevor das nächste Signal aktiviert wurde (vgl. Abb. 7.5).

Bei der Bewertung sollten die Vpn für jedes Signal jeweils auf 5-stufigen Likert-Skalen angeben, ob dieses als Hilfe beim Spurhalten empfunden wird, und ob und wie häufig ein LDWS mit dem Signal im eigenen Fahrzeug verwendet werden würde. Weiter wurde auf das Auftreten falscher bzw. subjektiv als unnötig empfundener Warnungen hingewiesen. Die

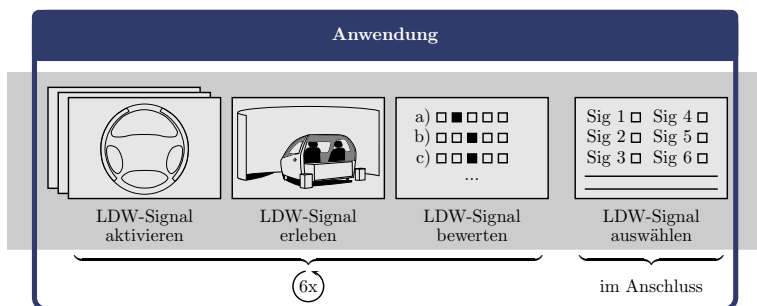


Abb. 7.5.: Versuchsphase „Anwendung“:

In der Phase „Anwendung“ wurden die haptischen Signale als LDW-Signale aktiviert, von den Vpn in der Simulation erlebt und bewertet. Abschließend wählten die Vpn ihr präferiertes Signal aus.

Vpn sollten bewerten, ob sie derartige Warnungen mit dem entsprechenden Signal bei absichtlichem Kurvenschneiden tolerieren würden, und ob sie es tolerieren würden, wenn das Warnsignal ohne ersichtlichen Grund auf freier Strecke ausgegeben wird. Abschließend sollten die Vpn ihren Gesamteindruck bewerten (E1 bis E5, Anhang C.1, S. 208).

Im Anschluss sollten die Vpn das Warnsignal mithilfe eines Semantischen Differentials beurteilen (M1 bis M16, Anhang C.1, S. 209). Dieses wurde auf Basis von Probandenäußerungen bei der SRC-Studie (Kapitel 6) und der Vorstudie zur Signaloptimierung (Abschnitt 7.1.2) sowie vorhandener Literatur ([Kop94], [LTBK06], [RBS09]) konstruiert, und beinhaltete Items zu den drei Dimensionen Wahrnehmbarkeit, Aufdringlichkeit und Verständlichkeit. Für die Bewertung aller Warnsignale benötigten die Vpn ca. 15 Minuten. Nach der letzten Bewertung sollten die Vpn ihren Favoriten aus den 6 Signalen wählen und diese Wahl begründen. Abschließend wurde nochmals der Fragebogen zur Befindlichkeit ausgegeben. Der Versuch dauerte in der Regel nicht länger als 1 h.

Studie LDW: Anwendung

In der Phase „Anwendung“ erlebten die Vpn alle haptischen Signale in der Simulation als Warngaben eines LDWS. Warnungen sollten von den Vpn aktiv durch Steuern des Fahrzeugs in Richtung Spurrand ausgelöst werden. Die Vpn sollten alle Warnsignale hinsichtlich verschiedener Eigenschaften und Merkmale bewerten und abschließend ein präferiertes Warnsignal auswählen.

7.1.4. Versuchsplan

Das haptische Signal mit den in Tab. 7.1 angegebenen Ausprägungen [H1] bis [H6] stellt die UV der Studie dar, die als within-subject Faktor variiert wurde. In der Phase „Interpretation“ werden Effekte der Variation der UV in der AV „Assoziationsstärke“ $A_{(i,j),n}$ erwartet, die für jede Vp n auf einer 5-stufigen Likert-Skala angibt, wie gut diese die haptischen Signale $i \in M_H$ mit den Fahrsituationen $j \in M_S$ assoziieren kann (von 1 = „passt gar nicht“ bis 5 = „passt sehr gut“). Die Mengen M_H und M_S sowie die relevanten Teilmengen $M_{S,LDW} \subset M_S$ und $M_{S,Sonst} \subset M_S$ sind nachfolgend angegeben.

Menge der Fahrsituationen: $M_S = \{[S1] - [S10]\}$

Spurverlassenssituationen: $M_{S,LDW} = \{[S6] - [S8]\}$

Sonstige Situationen: $M_{S,Sonst} = \{[S1] - [S5], [S9], [S10]\}$

Menge der haptischen Signale: $M_H = \{[H1] - [H6]\}$

Die AV in der Phase „Anwendung“ sind die subjektive Bewertung der Eigenschaften (E1 – E5) sowie Merkmale (M1 – M16) für jedes Signal durch die Vpn. Weiterhin wurden aus methodischen Gründen KV mit dem Vorfragebogen sowie den Zwischenfragebögen zur Befindlichkeit (alle Fragebögen s. Anhang C.1) erhoben.

7.2. Ergebnisse

7.2.1. Stichprobe

Für den Versuch wurden 23 Vpn (17 männlich, 6 weiblich) im Alter von 23 bis 43 Jahren ($M = 33,8$, $SD = 4,46$) über die Probandendatenbank (s. Abschnitt 5.2) akquiriert. Bei den Vpn handelte es sich bis auf eine Ausnahme um Rechtshänder.

Es wurden keine Probleme durch auftretende Fahrsimulatorekrankheit beobachtet, was aufgrund der simplen Fahraufgabe auch nicht erwartet wurde. In der Phase „Interpretation“ mussten die Angaben von 2 Vpn aus der Auswertung ausgeschlossen werden, da diese nicht instruktionsgemäß bewerteten, so dass hier lediglich 21 gültige Datensätze ausgewertet werden konnten. Für die Auswertung der Phase „Anwendung“ konnten die Datensätze aller 23 Vpn herangezogen werden.

7.2.2. Signalbezeichnungen

Nach der Erstdarbietung wurden die Vpn u. a. gebeten, Bezeichnungen für die gespürten haptischen Anregungen zu wählen. Hierdurch sollten insbesondere begriffliche Differenzierungen für propriozeptive und taktile Lenkrad“vibrationen“² erarbeitet werden. Die Ergebnisse sind Basis der Nomenklatur dieser Arbeit.

Die Antworten der Vpn können in drei Kategorien unterteilt werden. Bezeichnungen der ersten Kategorie beziehen sich auf mechanische Eigenschaften der Anregung (z. B. „Ruck“, „Impuls“, „Vibration“). In der zweiten Kategorie werden Assoziationen mit Fahrsituationen verbalisiert (z. B. „Fahrbahnunebenheit“, „Kopfsteinpflaster“, „Spurmarkierung“). In der dritten Kategorie beschreiben die Bezeichnung potentielle Einsatzgebiete der haptischen Signale (z. B. „Ausweichsignal“, „Spurverlassenswarnsignal“, „Bremswarnung“).

²vgl. Abschnitt 3.1.1, S. 20.

Während 11 Vpn für die nondirektionale taktile Lenkradvibration [H4] die Basisbezeichnung „Vibration“³ wählten, wurde das Lenkradrütteln [H2] lediglich von 4 Vpn als „Lenkradvibration“ bezeichnet. Häufig gewählte Bezeichnungen waren hier „Rütteln“ (3 Vpn) oder „Ruckeln“ (2). Die Bezeichnungen „Schütteln“, „Rumpeln“, „Rippel“ oder „Klopfen“ wurden von jeweils 1 Vp genannt.

16 der 23 Vpn wählten für die nondirektionale sowie für die einseitige Lenkradvibration([H4] und [H5]) identische Basisbezeichnung. Zur Unterscheidung wurden die Signale mit Attributen wie „einseitig“ bzw. „beidseitig“ oder „links/rechts“ versehen, teilweise wurden die Bezeichnungszusätze „schwach“ bzw. „stark“ zur Unterscheidung verwendet. Für die Signale „Lenkradrütteln mit Richtungsmoment“ [H3] sowie „Lenkradvibration mit Richtungsmoment“ [H6] wurden von den Vpn zumeist zusammengesetzte Bezeichnungen verwendet (z. B. „Moment mit leichter Vibration“, „Vibration mit Ziehen“, „Drehende Vibration“).

7.2.3. Spontane Assoziationen

Neben der Wahl einer Signalbezeichnung sollten die Vpn nach dem Erstkontakt angeben, welche Fahrsituationen sie mit den Anregungen assoziieren. Für das Signal „Lenkmoment“ [H1] wurde dabei am häufigsten die Assoziation „Spurrillen“ (6 Vpn) und „abschüssige Fahrbahn“ (3) genannt. Weiterhin resultierte das Lenkmoment in den Assoziationen häufig aus dem Kontakt mit einem Hindernis, wie bspw. abstrakt aus dem „Stoß mit einem Objekt“ (1) oder konkreter dem Kontakt mit dem „Bordstein“ (1), einer „Schiene“ (1) oder dem „Überfahren eines Schlaglochs“ (1). Weitere Assoziationen waren „Seitenwind“ (1), „Anfahren mit eingeschlagenem Lenkrad“ (1) sowie „Lösen des Lenkradschlösses“ (2).

Das Lenkradrütteln [H2] wurde häufig mit der Fahrt „über Kopfsteinpflaster“ (5) oder allgemeiner „über einen rauen Untergrund bzw. Belag“

³hierunter werden Bezeichnungen wie „Vibration“ oder „Vibrieren“ sowie zusammengesetzte bzw. erweiterte Bezeichnungen wie „Vibrationshinweis“ oder „sanfte Vibration“ zusammengefasst.

(6) assoziiert. Ebenfalls häufig wurde die Assoziation „ABS“ genannt (5). 2 Vpn erinnerte das Signal an ein ausbrechendes Fahrzeugheck. Jeweils eine Vp assoziierte das Lenkradrütteln mit dem „Überfahren einer Spurmarkierung“, dem „Überfahren eines Nagelbandes“ sowie dem „Abkommen in den unbefestigten Spurrand“. Das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment [H3] assoziierte eine Vp mit „Kopfsteinpflaster“. Neben den Assoziationen „einseitige Unebenheit“ (4), „Spurmarkierung“ (2), „Nagelband“ (2), „unbefestigter Spurrand“ (1) sowie „schräg überfahrene Spurrillen“ (1) wurden weiterhin die Assoziationen „Bremsrubbeln“ (1), „platter Reifen“ (1) sowie „ABS“ (2) genannt.

Die Lenkradvibrationssignale ([H4] bis [H6]) konnten bei den wenigsten Vpn Assoziationen zum Fahrzeugkontext hervorrufen. Die einzigen derartigen Assoziationen bei der Lenkradvibration waren „raue Straße“ (2), „Spurmarkierung“ (2) sowie „rubbende Reifen“ (1). Die einseitige Lenkradvibration erinnerte lediglich 1 Vp an eine „Holperstrecke“, alle anderen Vpn hatten keine Assoziation zum Fahrzeugkontext. Die Lenkradvibration mit Richtungsmoment assoziierten 3 Vpn mit „Randstreifen“ bzw. „Fahrbahnrand“ und 2 Vpn mit „Spurrillen“.

10 der 23 Vpn erinnerten die Lenkradvibrationssignale spontan an den Vibrationsalarm ihres Mobiltelefons („Handyvibration“, „Gesprächsinformation“, „empfangene SMS“). Vor Versuchsbeginn wurden die Vpn zur Gewährleistung des unterbrechungsfreien Versuchsablaufs gebeten, ihre Mobiltelefone aus bzw. auf lautlos zu stellen. Es wurde zunächst ein Zusammenhang zwischen dieser Instruktion und der Assoziation zum Vibrationsalarm vermutet, woraufhin nach den ersten fünf Vpn kein derartiger Hinweis mehr gegeben wurde. Dennoch wurde die Assoziation zur Handyvibration weiterhin unverändert häufig genannt.

7.2.4. Bewertung der vorgegebenen Assoziationen

Auf 5-stufigen Likert-Skalen sollten die Vpn bewerten, wie gut die haptisch wahrgenommenen Anregungen am Lenkrad mit den angenommenen Anregungen in visuell dargebotenen Fahrsituationen übereinstim-

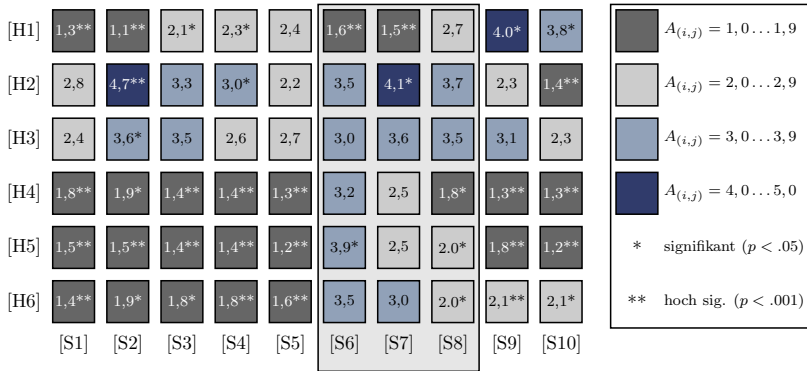


Abb. 7.6.: Assoziationsstärken $A_{(i,j)}$ der haptischen Signale i zu den vorgegebenen Fahrsituationen j :

$A_{(i,j)}$ gibt an, wie gut eine Anregung $i \in M_H$ im Mittel mit der angenommenen Anregung bei Fahrsituation $j \in M_S$ übereinstimmt ($1 = „passt gar nicht“, 5 = „passt sehr gut“$). Diese ist gekennzeichnet, wenn die Beurteilung der Vpn signifikant (*) bzw. hoch signifikant (**) überzufällig ausfällt. Die umrandeten Fahrsituationen beschreiben ein drohendes Spurverlassen.

men. Diese Assoziationsstärken $A_{(i,j)}$ sollen einen Hinweis auf das Potential der Signale geben, eine situationsadäquate Bedeutung zu vermitteln, aufgrund derer Vorteile bei der Interpretation der Warnsituation und damit bessere Reaktionsleistungen erwartet werden. In Abb. 7.6 sind die mittleren Assoziationsstärken (arithmetischer Mittelwert der Bewertung aller Vpn) angegeben. Die farbliche Codierung zeigt an, ob die Assoziation zur vorgegebenen Situation im Mittel eher abgelehnt (graue Markierungen, $A_{(i,j)} < 3$) oder eher angenommen wird (blaue Markierungen, $A_{(i,j)} \geq 3$). Mit Hilfe von χ^2 -Tests wurde weiter ermittelt, ob sich die Beurteilungen der Vpn signifikant ($p < .05$) bzw. hoch signifikant ($p < .001$) von einer zufälligen Beurteilung unterscheiden. In Abb. 7.6 sind entsprechende Felder gekennzeichnet.

Das Lenkmomentsignal [H1] wird am stärksten zu den Fahrsituationen „Bordstein“ [S9] und „Seitenwind“ [S10] assoziiert. Assoziationen zu den

Spurverlassenssituationen [S6]-[S8] sowie zu allen anderen Situationen werden zumindest tendenziell, meist jedoch (hoch) signifikant abgewiesen. Die höchste Assoziationsstärke ergibt sich für die Fahrsituation „Kopfsteinpflaster“ [S2] und das Lenkradrütteln [H2]. Die Übereinstimmung zwischen dem Lenkradrütteln und der Situation „Nagelband“ [S7] ist die höchste Übereinstimmung eines Signals mit einer Spurverlassenssituation, und auch die Assoziationen zu den beiden anderen Spurverlassenssituationen [S6] und [S8] werden beim Lenkradrütteln zumindest tendenziell angenommen. Beim Lenkradrütteln mit Richtungsmoment [H3] kann eine Zustimmung nur noch für die Assoziation zur Fahrsituation „Kopfsteinpflaster“ [S2] statistisch belegt werden.

Bei der beid- und einseitigen Lenkradvibration ([H4] und [H5]) werden Assoziationen zu allen Fahrsituationen, die kein Spurverlassen beschreiben, statistisch belastbar abgelehnt. Für beide Signale wird lediglich die Assoziation „Spurmarkierung“ [S6] angenommen, wobei diese Zustimmung lediglich für die einseitige Lenkradvibration signifikant ausfällt.

Durch die Addition des Richtungsmoments zum Lenkradrütteln wird die starke Assoziation zur Fahrsituation „Kopfsteinpflaster“ [S2] deutlich abgeschwächt. Das zusätzliche Richtungsmoment bewirkt weiterhin, dass die überzufällig hohen Assoziationsstärken zu den Spurverlassenssituationen [S6]-[S8] abgeschwächt werden, und eine Zustimmung der Vpn nur noch tendenziell beobachtet werden kann. Gegensätzliche Auswirkungen können bei der Addition des Richtungsmoments zur Lenkradvibration festgestellt werden. Hier nimmt die Assoziationsstärke zu den Spurverlassenssituationen durch das zusätzliche Richtungsmoment zu, erreicht jedoch keine statistische Bedeutsamkeit. In der Gesamtbetrachtung kann bei lediglich 6 der 60 Kombinationen eine subjektiv empfundene Übereinstimmung zwischen visuell dargebotener Fahrsituation und haptischer Anregung am Lenkrad statistisch nachgewiesen werden.

Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere die Assoziationen zu den Spurverlassenssituationen [S6] bis [S8] relevant. Für die weiteren Betrachtungen werden für jedes Signal $i \in M_H$ die Maße p_i und q_i definiert, die das Erstellen von Rangordnungen ermöglichen. Es wird darauf

hingewiesen, dass es sich hierbei um ad hoc definierte subjektive Maße handelt, für die Interpretationsvorschläge gegeben werden, die jedoch keinen Anspruch auf eine erschöpfende Bewertung und Interpretation der Assoziationsstärken erheben.

$$p_i = \max \left\{ A'_{(i, j_{LDW})} \right\} \quad j_{LDW} \in M_{S, LDW} \quad (7.1)$$

$$q_i = p_i - \max \left\{ A'_{(i, j_{Sonst})} \right\} \quad j_{Sonst} \in M_{S, Sonst} \quad (7.2)$$

Das Maß p_i entspricht dem Maximum der normierten mittleren Assoziationsstärke A' eines Signals zu einer Spurverlassenssituation. Beim Maß q_i wird hiervon die maximale normierte Assoziationsstärke zu einer der sonstigen Fahrsituationen abgezogen. p_i kann als Potential eines Signals zur Aktivierung der gewünschten Assoziation mit der Situation „Spurverlassen“ (beim Einsatz in LDWS) interpretiert werden. q_i kann als Eignung eines Signals für die Funktion LDW interpretiert werden, die sich aus dem Potential zur Aktivierung der gewünschten Assoziation abzüglich dem Fehlinterpretationspotential ergibt. Für p_i und q_i ergeben sich die in Tab. 7.3 angegebenen Werte.

Tab. 7.3.: Potential eines Signals zur Aktivierung der gewünschten Assoziation mit der Situation „Spurverlassen“ (p_i) sowie Eignung der Signale als Warnsignal für die Funktion LDW (q_i).

Warnsignal	p_i		q_i	
	Wert	Rang	Wert	Rang
[H1] Lenkmoment	0,43	6	-0.32	6
[H2] Lenkradrütteln	0,79	1	-0,13	5
[H3] Rütteln + Moment	0,64	3	0	4
[H4] Lenkradvibration	0,55	5	0,33	3
[H5] einseitige Lenkradvibration	0,71	2	0,52	1
[H6] Vibration + Moment	0,63	4	0,35	2

7.2.5. Einsatzgebiete haptischer Signale in der Lenkung

Nach der Bewertung der vorgegebenen Assoziationen wurden die Anregungen als synthetisch erzeugte Warnsignale deklariert, und die Vpn nach potentiellen Einsatzgebieten haptischer Signale in der Lenkung befragt. Aufgrund der Konditionierung durch die vorab präsentierten Fahrsituationen sind die Ergebnisse mit Vorbehalt zu betrachten, werden aus Gründen der Vollständigkeit aber dennoch angeführt.

16 der 23 Vpn nannten als potentielle Anwendungsgebiete Systeme zur Spurverlassenswarnung bzw. Spurhalteassistenten. Von 6 Vpn wurde die Spurwechselwarnung, bspw. bei Objekten im toten Winkel des eigenen Fahrzeugs, als Einsatzgebiet genannt. Weitere 2 Vpn konnten sich vorstellen, mit den haptischen Lenkradsignalen vor drohenden Kollisionen von der Seite gewarnt zu werden. Jeweils 2 Vpn erachteten es als sinnvoll, mit den Signalen Navigationshinweise zu bekommen bzw. beim Einparkvorgang unterstützt zu werden. 3 Vpn konnten sich den Einsatz als Ausweichhinweissignale vorstellen.

Während diese Einsatzgebiete primär bei der Fahrzeugquerführung unterstützen, sahen 2 Vpn Potential der Signale darin, auf eine Geschwindigkeitsüberschreitung hinzuweisen. Nach Meinung von 7 Vpn kann mit haptischen Signalen in der Lenkung die Aufmerksamkeit des Fahrers, insbesondere bei Schläfrigkeit, erhöht werden. Weiter wurde als Anwendung die Warnung bei nasser Straße, Aquaplaning oder schlechter Fahrbahn (5 Vpn), bei geringem Reifendruck (4), leerem Tank (1) oder allgemein bei einem Defekt im Fahrzeug (4), sowie der Hinweis auf eine rote Ampel oder eine gefährliche Kreuzung (3) genannt.

7.2.6. Bewertung der Signale für die Funktion LDW

Eigenschaften der haptischen Spurverlassenswarnsignale

Nach dem Erleben jedes haptischen Spurverlassenswarnsignal in der Lenkung bewerteten die Vpn dieses hinsichtlich verschiedener Eigen-

schaften auf jeweils 5-stufigen Ratingskalen (s. Abb. 7.7, deskriptive Statistik und Varianzanalysen s. Tab. C.1 und C.2 in Anhang C). Alle Signale wurden als hilfreich eingestuft, wobei diese Einschätzung bei der Lenkradvibration mit Richtungsmoment [H6] und bei der einseitigen Lenkradvibration [H5] hoch signifikant, und beim Lenkradrütteln mit sowie ohne Richtungsmoment ([H2] und [H3]) signifikant von einer zufälligen Verteilung abweicht. Das Spurverlassenswarnsystem würde mit den Lenkradvibrations- oder Rüttelsignalen ([H2] bis [H6]) als Warnsignal eher verwendet werden, ein reines Lenkmoment [H1] als Warnsignal würden die Vpn hingegen eher abschalten.

Sowohl bei der einseitigen als auch bei der beidseitigen Lenkradvibration ([H4] und [H5]) würden die Vpn Warnungen bei absichtlichem Kurvenschneiden eher tolerieren. Bei allen anderen Warnsignalen würden derartige Warnungen eher nicht toleriert werden. Die Unterschiede sind hierbei zwischen der einseitigen Lenkradvibration [H5] und den Signalen mit Richtungsmoment ([H1], [H3] und [H6]) signifikant bzw. hoch signifikant (Signifikanzprüfung mit Hilfe von post-hoc Tukey-Tests, s. Tab. C.3 in Anhang C). Allgemein würden es die Vpn bei keinem Warnsignal tolerieren, wenn dieses ohne ersichtlichen Grund auf freier Strecke ausgegeben wird. Die geringste Toleranz wird hierbei wiederum statistisch nachweisbar den Signalen mit Richtungsmoment entgegengebracht.

Alles in allem wird das Lenkmomentsignal [H1] eher als ungeeignet bewertet, während alle anderen Signale in Summe eher geeignet sind, vor Spurverlassen zu warnen. Mit χ^2 -Tests konnte nachgewiesen werden, dass diese Bewertung bei der einseitigen Lenkradvibration [H5] signifikant und bei der Lenkradvibration mit Richtungsmoment [H6] hoch signifikant von einer zufälligen Einschätzung abweicht. Die Eignungsbewertung dieser Signale unterscheidet sich zudem signifikant von der empfundenen Eignung des Lenkmoments [H1] (Tab. C.3, Anhang C).

Abb. 7.8 stellt das Antwortverhalten der Vpn auf die Frage nach der allgemeinen Eignung der haptischen Signale als Spurverlassenswarnsignal (E5) in detaillierter Form dar. Während die Signale [H1] bis [H4] vereinzelt als „ungeeignet“ bewertet wurden, kann dies für [H5] und [H6] nicht

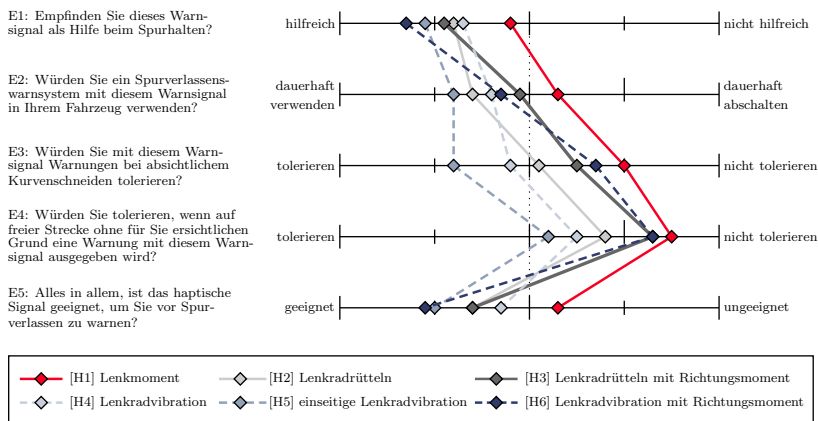


Abb. 7.7.: Eigenschaften der Spurverlassenswarnsignale:
Dargestellt sind die Mittelwerte der Einzelbewertungen der Vpn.

beobachtet werden. Die Lenkradvibration mit Richtungsmoment [H6] weist aufgrund der hohen Anzahl an Nennungen der Ausprägung „eher geeignet“ die größte (arithmetisch) mittlere Eignung der haptischen Signale auf (s. auch Abb. 7.7). Legt man dem Vergleich die Modalwerte der Einzelbewertungen zugrunde, so ergibt sich die höchste Eignung für die einseitige Lenkradvibration [H5], die von den Vpn am häufigsten mit der Maximalbewertung „geeignet“ versehen wurde.

Semantisches Profil

Mit Hilfe eines semantischen Differentials wurde jedes haptische Signal hinsichtlich 16 verschiedener Merkmale auf jeweils 7-stufigen Skalen bewertet. Die deskriptive Statistik des Antwortverhaltens (Tab. C.4 in Anhang C) zeigt, dass für jedes Merkmal jeweils der gesamte Bereich der Skala genutzt wurde. Über einfaktorielle Varianzanalysen wurden 10 Merkmale identifiziert, hinsichtlich derer sich (hoch) signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Signalen ergeben (s. Tab. C.5, Anhang C). Die hierfür verantwortlichen Signale wurden mit Hilfe von post-hoc

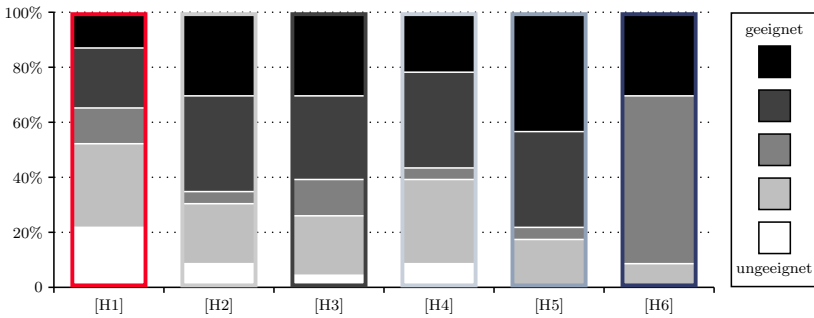


Abb. 7.8.: Eignung der Signale als LDW-Signale:

Verteilung der Antworten auf Frage: „Alles in allem, ist das haptische Signal geeignet, um Sie vor Spurverlassen zu warnen?“

Tukey-Tests identifiziert (Tab. C.6, Anhang C). Durch eine Faktorenanalyse können die 16 Merkmale auf zwei Faktoren reduziert werden, mit deren Hilfe 66,2% der Gesamtvarianz erklärt wird (Tab. C.7, Anhang C). Dabei laden 11 Merkmale hauptsächlich auf den ersten Faktor, der aus einer inhaltlichen Motivation heraus als „Verständlichkeit & Komfort“ des Signals interpretiert werden kann. Die restlichen Merkmale, die insbesondere auf den zweiten Faktor laden, werden als „Wahrnehmbarkeit“ des Signals aufgefasst (Tab. C.8, Anhang C). Abb. C.1 in Anhang C zeigt das Profil der haptischen Warnsignale auf den untersuchten Merkmalen.

Das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment sowie die Lenkradvibrationssignale mit Richtungsinformation ([H3], [H5] und [H6]) werden als klarer, präziser und verständlicher bewertet als die anderen Signale. Das Lenkmoment [H1] ist das einzige Signal, dass eher unkontrollierbar und eher unangemessen empfunden wird. Zudem wird es als das unangenehmste Signal bewertet. Die beidseitige sowie die einseitige Lenkradvibration ([H4] und [H5]) werden als am wenigsten stark (aber nicht schwach), am wenigsten auffällig (aber nicht unauffällig) und am wenigsten deutlich (aber nicht undeutlich) bewertet. Zudem sind diese beiden Signale am wenigsten aufdringlich, wobei die einseitige Lenkradvibrati-

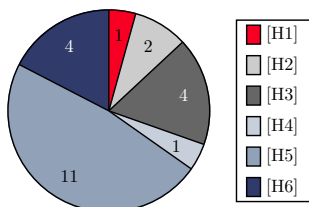


Abb. 7.9: Präferenz der Vpn:
Anzahl der Nennungen der Vpn bei der Wahl eines präferierten Signals.

on das einzige Signal ist, welches eher als unaufdringlich bewertet wird. Insbesondere hinsichtlich der Aufdringlichkeit, aber auch hinsichtlich der empfundenen Stärke unterscheidet sich die einseitige Lenkradvibration [H5] signifikant bzw. hoch signifikant von allen restlichen Signalen mit Ausnahme der nondirektionalen Lenkradvibration [H4].

Präferenz der Vpn

Im Anschluss an die Einzelbewertungen sollten die Vpn ihre Präferenz für *ein* Signal äußern und begründen. Die Anzahl der Nennungen je Signal ist in Abb. 7.9 dargestellt. Von 11 Vpn wird die einseitige Lenkradvibration [H5] präferiert, jeweils 4 Vpn entschieden sich für das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment [H3] sowie die Lenkradvibration mit Richtungsmoment [H6]. Das Lenkmoment [H1] und die Lenkradvibration [H4] als „klassische“ Spurverlassenswarnsignale wurden von jeweils 1 Vp favorisiert, das nondirektionale Lenkradrütteln [H2] von 2 Vpn.

Bei der Aufteilung der Signale in primär lenkmomentbasierte Signale ([H1] bis [H3]) und Signale mit Vibrationsanteil ([H4] bis [H6]) kann eine Präferenz für letztere festgestellt werden. Demnach entschieden sich 16 der 23 Vpn für ein Vibrationssignal, was sich als überzufällig herausstellt ($p < .05$). Ebenso kann mit 20 von 23 Nennungen eine Präferenz für Warnsignale mit Richtungsinformation gegenüber nondirektionalen Warnsignalen ([H2] und [H4]) festgestellt und statistisch belegt werden ($p < .03$). Weiterhin wählten 19 von 23 Vpn ein Vibrieren oder Rütteln am Lenkrad mit zusätzlicher Richtungsinformation ([H3], [H5], [H6]), was sich ebenfalls als statistisch signifikant herausstellt ($p < .002$).

7.3. Diskussion und Interpretation der Ergebnisse

Die einseitige Lenkradvibration [H5] ist unter allen untersuchten Alternativen das favorisierte Spurverlassenswarnsignal. Mit 11 Nennungen präferierte fast die Hälfte der Vpn diese Warnung, was fast der dreifachen Anzahl im Vergleich zu den weiteren favorisierten Warnsignalen, der Lenkradvibration mit Richtungsmoment [H6] und dem Lenkradrütteln mit Richtungsmoment [H3], entspricht. 10 Vpn, und damit mehr als bei jedem anderen Signal, bewerteten die einseitige Lenkradvibration als „geeignet“, um vor Spurverlassen zu warnen. Die Gültigkeit von Haupthypothese H.LDW kann demnach festgestellt, und die subjektive Eignung und Präferenz der einseitigen Lenkradvibration nachgewiesen werden, was das Hauptanliegen der vorliegenden Studie darstellt. Die weiter formulierten Unterhypothesen beschäftigen sich mit den Gründen für diese festgestellte Präferenz der einseitigen Lenkradvibration, die demnach im Potential zur Aktivierung der gewünschten Assoziation mit der Warnsituation, in der signalinhärenten Richtungsinformation bzw. in der geringeren Aufdringlichkeit der taktilen Anregung liegt.

Ein Großteil der Ergebnisdiskussion und -interpretation stützt sich auf die subjektiven Bewertungen der Vpn hinsichtlich der Eigenschaften und Merkmale der Signale, die mittels des Fragebogeninstruments erhoben wurden. Bei der Erstellung des Fragebogens wurden Erkenntnisse von Vorstudien ebenso berücksichtigt wie der in der Literatur dokumentierte Stand der Technik. Dennoch handelt es sich hierbei nicht um ein empirisch validiertes Messinstrument. Die vorliegende Arbeit erhebt nicht den Anspruch, ein derartiges Instrument zu erstellen, sondern in explorativer Art und Weise Ursachen für die subjektiven Entscheidungen der Vpn zu ermitteln, und diese Entscheidungen begründen zu können.

Hypothese H.LDW.3a kann zunächst als gültig angenommen werden. Die rein taktilen Vibrationssignale wirken weniger aufdringlich als die propriozeptiv wahrgenommenen Signale auf Basis von Lenkmomenten (vgl. Abb. C.1). Die identische Rangfolge wählen die Vpn bei der Bewertung der Signale hinsichtlich der Toleranz subjektiv unnötiger Warnun-

gen (vgl. Abb. 7.7, E3 und E4). Eine lineare Regressionsanalyse kann jedoch keine, gemäß Hypothese H.LDW.3b vermutete, relevante (lineare) Abhängigkeit zwischen der empfundenen Aufdringlichkeit eines Signals und der Toleranz unnötiger Warnungen aufzeigen ($R^2 = 0,183$ bei E3, $R^2 = 0,120$ bei E4). Diese wird primär durch das Vorhandensein eines Richtungsmoments beeinflusst. Ebenso wenig kann eine Abhängigkeit zwischen der empfundenen Aufdringlichkeit und der intendierten Nutzungshäufigkeit (E2, $R^2 = 0,169$) sowie der subjektiven Eignung des Signals (E5, $R^2 = 0,139$) festgestellt werden. Die Hypothesen H.LDW.3c und H.LDW.3d sind somit ebenfalls abzulehnen.

Da der hypothetisierte Zusammenhang zwischen der Aufdringlichkeit eines Signals und dessen empfundener Eignung nicht nachgewiesen werden kann, wird über Regressionsanalysen ermittelt, welche der mit dem semantischen Differential erhobenen Merkmale einen Einfluss auf die Eignung auswirken. Dabei werden die empfundene Eignung der Signale als AV und deren Merkmalsbewertungen jeweils als UV betrachtet. Als Modellannahme werden wiederum lineare Zusammenhänge zugrundegelegt. Da Einflüsse lediglich qualitativ aufgedeckt werden sollen, wird auf Schritte der Datenaufbereitung (insbesondere Identifikation möglicher Ausreißer) verzichtet. In Abb. 7.10 sind die Gütemaße R^2 der Regressionen in absteigender Reihenfolge dargestellt.

Einen maßgeblichen Einfluss hat demnach die „Angemessenheit“ des haptischen Signals. Von den im Rahmen der Studie untersuchten Signalen wurde dabei lediglich das reine Lenkmoment [H1] im Vergleich zu den restlichen Signalen als eher unangemessen bewertet – trotz der vorherigen Signaloptimierungen in der Vorstudie. Darüber hinaus bestimmt insbesondere die „Verständlichkeit“ eines Warnsignals (repräsentiert durch die Merkmale „Klarheit“, „Verständlichkeit“ und „Präzision“) dessen wahrgenommene Eignung. Diese Verständlichkeit ist unabhängig von der Stärke des Warnsignals. So werden bspw. die einseitige Lenkervibration sowie das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment als annähernd gleich verständlich bewertet, unterscheiden sich jedoch hochsignifikant hinsichtlich ihrer empfundenen Stärke (vgl. Abb. C.1 sowie Tab. C.6, Anhang C). Allgemein haben Signaleigenschaften auf der Ge-

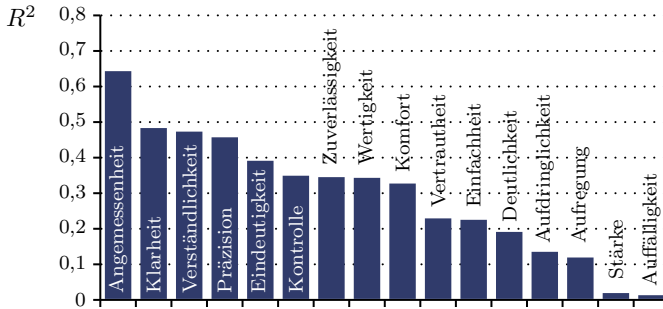


Abb. 7.10.: Relevante Merkmale der haptischen Signale:

Über lineare Regressionsanalysen wurde ermittelt, welche Merkmale die empfundene Eignung eines Signals zur Warnung bei Spurverlassen beeinflussen.

fühlsdimension Potenz (z. B. Merkmal „Stärke“) eher einen untergeordneten Einfluss auf die empfundene Eignung des Signals.

Unter Berücksichtigung der Literatur scheint es naheliegend, dass ein Warnsignal insbesondere dann als „verständlich“ bewertet wird, wenn durch das Signal eine zur Warnsituation adäquate Assoziation aktiviert wird. Im Falle der Spurverlassenswarnung wird dies bei einem Vibrations- bzw. Rüttelanteil im Warnsignal vermutet, der die Vpn an das Überfahren einer strukturierten Spurmarkierung oder eines Rüttelstreifens neben der Spur erinnern soll. In der vorliegenden Studie wird dies im Versuchsteil „Interpretation“ untersucht. Bei den Vibrationssignalen [H4] bis [H6] scheint diese Assoziationsvermittlung demnach zu gelingen. Diese werden zwar als synthetische Signale wahrgenommen, die zunächst keine bekannte Entsprechung im natürlichen Fahrkontext aufweisen. Von den angebotenen Assoziationen wird allerdings gerade die Spurverlassenssituation „Spurmarkierung“ (bei [H6] auch „Nagelband“) am ehesten angenommen, alle spurverlassensfremden Assoziationen werden statistisch belastbar abgelehnt. Durch die lediglich einseitige Applikation der Lenkradvibration wird die Assoziation des Überfahrens einer Spurmarkierung noch verstärkt und erreicht statistische Signifikanz. Da

auch das nondirektionale Lenkradrütteln [H2] gemäß Abb. 7.6 die Assoziation zu einer Spurverlassenssituation hervorrufen kann, werden die Hypothesen H.LDW.1a und H.LDW.1b nicht abgelehnt.

Tendenzielle Anstiege der Assoziationsstärken zu den Spurverlassenssituationen sind bei der Überlagerung der Lenkradvibration mit einem Richtungsmoment zu beobachten, so dass Hypothese H.LDW.1c bezüglich der Lenkradvibration verworfen werden muss. Da diese Anstiege jedoch nicht statistisch signifikant ausfallen und somit auch dem Zufall geschuldet sein können, wird diesbezüglich kein Interpretationsversuch unternommen. Mit Blick auf die Assoziationsstärken kann Hypothese H.LDW.1c bezüglich des Einflusses des zusätzlichen Richtungsmoments auf das Lenkradrütteln zunächst angenommen werden. Demnach ist Signal [H3] nicht in einem zum nondirektionalen Lenkradrütteln [H2] vergleichbaren Maße in der Lage, mit Spurverlassen assoziiert zu werden. Dennoch werden beide Signale als gleich geeignet bewertet.

Es muss hierbei festgestellt werden, dass die im Versuchsteil „Interpretation“ ermittelten Assoziationsstärken nicht ohne Weiteres auf das Potential der Signale zur Aktivierung der gewünschten Assoziation in der realen Anwendung übertragen werden können. Während die Vpn bei der Bewertung der vorgegebenen Fahrsituationen eine eher passive Haltung bzgl. der eigenen Lenktätigkeit einnahmen, erforderte die Bewertung der Signale in der Spurverlassenssituation im Versuchsteil „Anwendung“ ein aktives Eingreifen in die Fahrzeugquerführung. Das Richtungsmoment stellte hier einen ersten dezenten Richtungshinweis dar, der aufgrund der leichten Übersteuerbarkeit durch die folgenden fahrerinduzierten Lenkaktionen überlagert wurde. Im Gegensatz dazu war das Rüttelmoment während der gesamten Dauer des Spurverlassens spürbar. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass die Vpn den initialen Impuls des Richtungsmoments vom Rütteln trennen und letzteres als reines Rüttelsignal bewerten. Somit wird angenommen, dass in der Anwendung beide Signale [H2] und [H3] mit Spurverlassen assoziiert werden, auch wenn dies aus den im Versuchsteil „Interpretation“ ermittelten Assoziationsstärken nicht hervorgeht.

Es kann allgemein davon ausgegangen werden, dass alle Warnsignale mit Vibrations- oder Rüttelanteil in der Anwendung als LDW-Signal mit Spurverlassen assoziiert werden. Sobald die Fahrer in die Lenkung eingreifen, dominiert dieser Vibrations- bzw. Rüttelanteil über etwaige richtungsgebende Lenkmomentanteile, die in den Fahrer generierten Lenkmomenten untergehen. In der passiven Haltung der Fahrer im Versuchsteil „Interpretation“ tritt dies nicht zu Tage, was als methodischer Mangel anzusehen ist, der die Aussagekraft dieses Versuchsteils schmälert. Wenn dieses Aktivieren der situationsadäquaten Assoziation wie angenommen ursächlich für die Verständlichkeit des Warnsignals ist, müssten somit die Signale [H2] bis [H6] als gleich verständlich bewertet werden. Der Blick auf Abb. C.1 macht deutlich, dass dies nicht der Fall ist. Demnach werden die Lenkradvibration mit Richtungsmoment [H6], die einseitige Lenkradvibration [H5], sowie das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment [H3] als klarer, präziser und verständlicher bewertet als das nondirektionale Lenkradrütteln [H2] und -vibrieren [H4].

Begründet wird dies durch die zusätzliche Richtungsinformation, die im Falle der einseitigen Lenkradvibration [H5] dauerhaft, und bei den Signalen [H3] und [H6] initial wahrgenommen wird. Die „Verständlichkeit“ eines Warnsignals bezieht sich somit sowohl auf die Verständlichkeit des *Warngrundes*, der durch ein Rütteln oder Vibrieren kommuniziert wird, als auch auf die Verständlichkeit der notwendigen *Handlung*, die in Form einer Richtungsempfehlung übermittelt wird. In Summe präferieren die Vpn zu knapp 87% Warnsignale mit Richtungsinformation gegenüber nondirektionalen Warnsignalen. Damit können die Befunde von [TJP⁺96] bestätigt werden, die in ihrer Untersuchung eine Präferenz für directionale Signale feststellen konnten. Hypothese H.LDW.2 wird als gültig betrachtet. Die zur konkreten Handlungsplanung notwendige Richtungsinformation sollte demnach haptisch übertragen werden, wenngleich die haptische Aufforderung alleine nicht zur Handlungsausführung genügt, sondern durch den Blick auf die Straße validiert wird ([SJ03]).

Bei der konkreten Auswahl des präferierten unter den verständlichen und damit potentiell geeigneten Warnsignalen spielt in der vorliegenden

Studie wiederum die Signalstärke eine Rolle. In 11 von 19 Fällen, in denen ein direktionales Vibrations- bzw. Rüttelsignal favorisiert wird, ist dies die einseitige Lenkradvibration. Diese wird als signifikant bzw. hoch signifikant weniger stark (aber nicht schwach) und weniger auffällig (aber nicht unauffällig) bewertet als das Vibrieren bzw. Rütteln mit Richtungsmoment ([H3] und [H6]). Weiterhin ist die einseitige Lenkradvibration das einzige als nicht aufdringlich bewertete Signal, und unterscheidet sich damit u. a. hoch signifikant vom Lenkradrütteln mit Richtungsmoment und von der Lenkradvibration mit Richtungsmoment.

7.4. Empfehlungen für die Spurverlassenswarnung

Für die haptische Warnung am Lenkrad bei Spurverlassen wird in der Literatur eine Vielzahl an Signalen vorgeschlagen. In der groben Zusammenfassung kann diesen Signalen zumeist ein objektiver Nutzen in der tatsächlich kritischen Spurverlassenssituation bescheinigt werden. Weitaus geringer fällt bisher die Einbeziehung subjektiver Anforderungen und Präferenzen der Fahrer aus. Es kann auf Basis der bestehenden Literatur die Annahme formuliert werden, dass ein aus Nutzersicht geeignetes Spurverlassenswarnsignal ein Vibrieren oder Rütteln am Lenkrad mit einer Richtungsinformation kombinieren sollte. Diese Annahme kann in der vorliegenden Studie bestätigt werden.

Als wesentlicher Einflussfaktor auf die empfundene Eignung eines Warnsignals zur Übermittlung einer Spurverlassensgefahr kann neben der „Angemessenheit“ die „Verständlichkeit“ des Signals identifiziert werden. Ein aus Nutzersicht geeignetes Signal vermittelt somit den Grund der Warnung über ein Vibrieren oder Rütteln am Lenkrad, was die Assoziation zu einer Spurverlassenssituation aktivieren kann. Darüber hinaus sollte eine Richtungsinformation eine Handlungsempfehlung kommunizieren. Für die Funktion LDW können somit zunächst alle haptischen Signale empfohlen werden, die diese Eigenschaften aufweisen.

Basierend auf den Studienergebnissen muss dabei insbesondere eine Empfehlung für die einseitige Lenkradvibration ausgesprochen werden,

die sich eindeutig als favorisiertes Warnsignal herausstellt. Fast die Hälfte aller Vpn präferierte die einseitige Lenkradvibration unter 6 haptischen Warnsignalen in der Lenkung, die vorab für die Funktion LDW optimiert wurden. Zur Übermittlung der gewünschten Richtungsinformation bedarf es hierbei keiner Lenkmomentenanregung, was für die finale Präferenz der Vpn ausschlaggebend gewesen sein kann. Signale, die eine Richtungsinformation über ein gerichtetes Lenkmoment kommunizieren, werden in der vorliegenden Studie als am auffälligsten und deutlichsten, gleichzeitig aber auch am stärksten und aufdringlichsten, sowie unangenehm und teilweise unkontrollierbar bewertet, was zu einer signifikant geringeren Toleranz der Fahrer gegenüber subjektiv als unnötig empfundenen Warnungen führt. Die aus dem Stand der Technik hergeleitete potentielle Eignung der einseitigen Lenkradvibration für die Funktion LDW kann demnach empirisch validiert werden.

Zusammenfassung der Hypothesen und Ergebnisse

- H.LDW:** Die einseitige Lenkradvibration wird als Spurverlassenswarnsignal subjektiv präferiert.
- .1a:** Die (nondirektionale) Lenkradvibration und das (nondirektionale) Lenkradrütteln werden mit Spurverlassen assoziiert.
 - .1b:** Einseitige Lenkradvibrationen werden ebenso mit Spurverlassen assoziiert.
 - .1c:** Durch die Überlagerung der Lenkradvibration bzw. des Lenkradrüttelns mit einem Richtungsmoment wird die Assoziation zu Spurverlassen abgeschwächt.
 - .2:** Direktionale Warnsignale werden den entsprechenden nondirektionalen Ausprägungen der Warnsignale aufgrund der zusätzlichen Richtungsinformation vorgezogen.
 - .3a:** Propriozept. Signale wirken aufdringlicher als taktile Signale.

.3b: Je aufdringlicher ein Signal, desto weniger subjektiv unnötige Warnungen werden toleriert.

.3c: [...], desto eher wird das System deaktiviert.

.3d: [...], als desto ungeeigneter wird es bewertet.

Die Haupthypothese H.LDW wird durch die Studienergebnisse bestätigt. Die einseitige Lenkradvibration ist das klar präferierte Spurverlassenswarnsignal.

Die Hypothese H.LDW.1a und H.LDW.1b werden nicht abgelehnt. Das nondirektionale Vibrieren und Rütteln sowie die einseitige Lenkradvibration können die Assoziation zu einer Spurverlassenssituation hervorrufen. Hypothese H.LDW.1c muss insbesondere für die Überlagerung der Lenkradvibration durch ein Richtungsmoment verworfen werden, da dies zu tendenziellen Anstiegen der Assoziationsstärken zu den Spurverlassenssituationen führt.

Hypothese H.LDW.2 wird als gültig erachtet. Es kann eine deutliche Präferenz von Warnsignalen mit Richtungsinformation gegenüber nondirektionalen Warnsignalen festgestellt werden, die auf die zusätzliche Richtungsinformation zurückzuführen ist.

Auch Hypothese H.LDW.3a kann als gültig angenommen werden. Die rein taktilen Lenkradvibrationssignale wirken weniger aufdringlich als die Lenkmomentsignale. Es kann jedoch kein Einfluss der empfundenen Aufdringlichkeit auf die Toleranz subjektiv unnötiger Warnungen, auf die intendierte Nutzungshäufigkeit und auf die subjektive Eignung festgestellt werden, so dass die Hypothesen H.LDW.b-d abzulehnen sind.

8. Haptische Ausweichempfehlung

„Die einseitige Lenkradvibration kann in einer drohenden Kollisionssituation eine Ausweichreaktion hervorrufen.“

(Haupthypothese H.FCW)

8.1. Einführung und Methodik

8.1.1. Motivation

Eine einseitige Lenkradvibration ist aus Fahrersicht geeignet, um vor drohendem Spurverlassen zu warnen (vgl. Kapitel 7). Es kann hieraus die Hoffnung geäußert werden, dass Fahrer ein entsprechendes LDWS nicht deaktivieren, und sich nach einer gewissen Nutzungsdauer eine robuste Reiz-Reaktions-Verknüpfung einstellt, nach der die einseitige Lenkradvibration eine kontralaterale Lenkreaktion hervorruft. Daraus kann für dieses Signal das Potential hypothetisiert werden, auch bei Applikation in einer Situation, in der keine unmittelbare Spurverlassensgefahr besteht, eine kontralaterale Lenkreaktion zu bewirken.

Wie in Abschnitt 3.1.3 beschrieben, konnten Kleen & Schmidt durch die haptische Signalisierung einer Ausweichempfehlung in Form eines gerichteten Lenkmomentes eine signifikante Erhöhung der Anzahl der Ausweichreaktionen in einer drohenden Kollisionssituation erzielen ([KS09], vgl. auch [Ape98]). Es soll nun untersucht werden, ob die einseitige Lenkradvibration einen vergleichbaren Einfluss auf die Fahrerreaktion in einer kritischen Kollisionssituation¹ hat.

¹ Als Kollisionssituation werden alle Situationen mit drohender Kollision bezeichnet, auch wenn diese durch eine adäquate Fahrerreaktion vermieden werden kann.

8.1.2. Versuchsdesign und -ablauf

Eingrenzung möglicher Kollisionssituationen

Wie bspw. in den in [Ben08] sowie [KS09] beschriebenen Studien werden auch in der vorliegenden Studie lediglich Ausweichempfehlungen *nach links* gegeben. Zum einen ist davon auszugehen, dass im realen Straßenverkehr mehr Unfälle durch ein Ausweichen nach links vermieden werden können als durch ein Ausweichen nach rechts². Zum anderen wird angenommen, dass für Fahrer ein Ausweichen nach links einfacher ist als ein Ausweichen nach rechts³. Nach Aussagen der Vpn in den ersten Studien handelt es sich bei der einseitigen Lenkradvibration eher um einen dezenten Hinweis, der Fahrer auf der Ebene der Informationsaufnahme und nicht bei der motorischen Handlungsausführung unterstützt. Es scheint damit fraglich, ob durch ein derartiges Signal ein ungewohntes Ausweichen nach rechts initiiert werden kann.

Um jedoch potentielle Ausweichreaktionen nach rechts nicht pauschal zu unterbinden, wird eine symmetrische Kollisionssituation angestrebt, in der für die Vpn prinzipiell ein Ausweichen in beide Richtungen möglich erscheint. Damit unterscheidet sich die vorliegende Studie von einem großen Anteil publizierter Studien zu Kollisionswarnsystemen, in denen den Vpn lediglich ein Ausweichen nach links angeboten wird. Als GrundszENARIO wurde in der vorliegenden Studie eine dreispurige Fahrbahn von den Vpn in der mittleren Spur befahren.

²Insbesondere auf Stadt-, Land- und Bundesstraßen wird ein Ausweichen nach rechts häufig durch bauliche Gegebenheiten verhindert, so dass – wenn überhaupt – lediglich nach links über die Gegenspur ausgewichen werden kann. Von den knapp 48.500 im Jahre 2009 registrierten Unfällen der Unfallart „Zusammenstoß mit einem anderen Fahrzeug, das vorausfährt oder wartet“ ereigneten sich ca. 30.500 Unfälle innerorts, ca. 11.000 außerorts ohne Autobahnen und ca. 7.000 auf Autobahnen (Quelle: Statistisches Bundesamt).

³Fahrer sitzen im Fahrzeug nicht mittig sondern nach links versetzt (bei Rechtsverkehr), wodurch der Bereich links eines Vorderfahrzeugs besser überschaubar ist. Weiterhin werden bei Überholvorgängen Vorderfahrzeuge i.d.R. links überholt.

Wie Bender feststellt, ist die „[...] Art der Fahrerreaktion [...] in hohem Maße durch die Situation bestimmt“ ([Ben08], S. 67). Wie bereits beschrieben stellen Apel ([Ape98]) sowie Kleen & Schmidt ([KS09]) in ihren Untersuchungen in der ungewarnten Bedingung eine Tendenz zu Bremsreaktionen fest. Diese Ergebnisse stehen in Konflikt zu den Ergebnissen von Bender, die im Einklang mit weiteren Studien bei dem von ihr untersuchten Ausweichmanöver, welches durch ein von rechts entfallendes Hindernis provoziert wird, eine Tendenz zum Lenken beobachten kann. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass durch die Richtungsinformation eines von der Seite erscheinenden Hindernisses die Tendenz zu einer Ausweichreaktion erhöht wird, und da eine Kollisionssituation angestrebt wird, auf welche die Vpn in der ungewarnten Bedingung eher mit Bremsen statt mit Lenken reagieren, wurde für die vorliegende Studie ein frontal erscheinendes Hindernis realisiert. Damit sind Kollisionssituationen ausgeschlossen, die bspw. durch einen von der Seite einlaufenden Fußgänger oder ein von der Seite einfahrendes Fahrzeug (z. B. [LM91], [WLKB01]) provoziert werden.

Zur Gewährleistung der ökologischen Validität sollte eine realistische Kollisionssituation simuliert werden, so dass bspw. von unmittelbar erscheinenden („aufpoppenden“) Hindernissen Abstand genommen wird. Weiterhin sollte die Verkehrssituation auch in der Kollisionssituation für die Vpn überschaubar sein, und die Sichtweite nicht wie bspw. in [Die06] durch Nebel o. ä. eingeschränkt werden, so dass der Entscheidungsprozess zwischen den Handlungsalternativen Bremsen und Lenken nicht beeinflusst wird. Vergleichbar mit dem in [KS09] skizzierten Vorgehen wurde die Kollisionssituation in der vorliegenden Studie durch ein plötzlich abbremsendes Vorderfahrzeug realisiert.

Barthel vergleicht verschiedene in Studien realisierte Kollisionssituationen und kommt zu dem Schluss, „[...] dass eine realitätsnahe Fahrerreaktion (Schreck, Entscheidung zwischen Lenken und Bremsen) nur dann analysiert werden kann, wenn das Manöver lediglich einmal durchfahren wird und der Fahrer keine Kenntnis vom eigentlichen Versuchszweck hat“ ([Bar04a], S. 27). Diese Feststellung wurde in der vorliegenden Studie berücksichtigt.

Aufgabe der Vpn im Egofahrzeug (EF) war ein Folgeszenario, in dem einem Vorderfahrzeug (VF) in der mittleren Spur einer dreispurigen Straße gefolgt werden sollte. Das Kollisionsereignis wurde durch ein plötzliches Abbremsen des VF erreicht. Bei aktiver Fahrerwarnung erhielten die Vpn einen nach links gerichteten Ausweichhinweis. Dabei wurde jede Vp lediglich mit *einer* Kollisionssituation konfrontiert.

Anforderungen an die Warnauslösung

Für die weiteren Betrachtungen werden zunächst zweckmäßige Erläuterungen der Begriffe „Time Headway (TH)“ und „Time to Collision (TTC)“ eingeführt. TH bezeichnet den zeitlichen Abstand zwischen dem Vorderfahrzeug (VF) und dem Egofahrzeug (EF), und wird u. a. zur Beschreibung von Folgekonditionen herangezogen (z. B. [SG08]). TH sollte bei der Initiierung der Kollisionssituation kontrolliert werden. In [KS09] wird die Kollisionssituation aus einer Folgesituation mit TH zwischen 1700 und 2500 ms ausgelöst. In [Ape98] beträgt TH ca. 2800 ms, in [SG08] werden 2000 ms vorgegeben. Für die vorliegende Studie wurde ein Wert in diesem Bereich angestrebt. Die TTC ist die Zeitspanne, die zwischen dem Auftauchen des Hindernisses (Beginn des Bremsvorgangs von VF) und dem Zusammenstoß mit demselben bei ausbleibender Fahrerreaktion vergeht (z. B. [Bar04a], S. 27). Das Unterschreiten einer gewissen TTC wird häufig als Kriterium für die Warnauslösung herangezogen ([Bar04a]). In der vorliegenden Untersuchung wurde die zunächst angestrebte TTC von ca. 3000 ms (vgl. [SG08], [HG97]) aufgrund von Expertenmeinungen nach den Vorversuchen auf 2500 ms reduziert.

Wie Kiefer und Kollegen bemerken, ist die subjektive Bewertung von Zeitgrößen wie bspw. der TTC stark von den aktuellen kinematischen Bedingungen abhängig ([KLF05]). Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit wurde im vorliegenden Versuch eine möglichst geringe interindividuelle Varianz sowohl in den abgeleiteten Zeitgrößen (TH und TTC)

als auch in den unmittelbaren kinematischen Größen (z. B. Absolutgeschwindigkeit, Abstand zu VF) angestrebt. Weiterhin wird angenommen, dass das subjektive Sicherheitsempfinden bei der Fahrt hinter einem VF interindividuell variiert. Das Szenario wurde derart ausgelegt, dass nur geringe Schwankungen im subjektiven Sicherheitsempfinden erwartet wurden. Zur Kontrolle wurde dieses durch Befragung erhoben.

Für die nachfolgenden Berechnungen gelten die folgenden Zusammenhänge: Zum Zeitpunkt t_0 fahre EF mit einer Geschwindigkeit $v_{EF,0}$ in einem Abstand d_0 hinter VF, welches die Geschwindigkeit $v_{VF,0}$ aufweise. Zu diesem Zeitpunkt t_0 beginne VF mit einem Bremsmanöver in den Stillstand, welches bei ausbleibender Reaktion der Vp in EF zur Kollision führt. Für dieses Bremsen in den Stillstand benötigt EF eine Dauer⁴ von Δt . Der Zeitpunkt t_0 wird den Vpn visuell durch das Aufleuchten der Bremslichter von VF signalisiert. EF befinde sich zum Zeitpunkt t_0 an der Position $s_{EF,0} = 0$, VF an der Position $s_{VF,0} = d_0$. Die Geschwindigkeitsfunktion von VF bis zum Stillstand beträgt:

$$v_{VF}(t) = v_{VF,0} - \frac{v_{VF,0}}{\Delta t} \cdot t, \quad t > t_0 \quad (8.1)$$

Die Position, an der VF zum Stehen kommt, ergibt sich dann zu:

$$s_{VF,1} = s_{VF}(t_0 + \Delta t) = d_0 + \int_0^{\Delta t} v_{VF}(t) dt = d_0 + \frac{v_{VF,0}}{2} \cdot \Delta t \quad (8.2)$$

Bei ausbleibender Fahrerreaktion befindet sich EF zum Zeitpunkt des Stillstands von VF bei:

$$s_{EF,1} = s_{EF}(t_0 + \Delta t) = v_{EF,0} \cdot \Delta t \quad (8.3)$$

Die haptische Warngabe erfolgt zeitgleich mit dem Einleiten des Bremsmanövers von VF und dem Aufleuchten der Bremsleuchten. Die

⁴In der für die Simulation verwendeten Szenarienbeschreibungssprache erfolgt die Beschreibung eines Bremsmanövers nicht über die Bremsverzögerung, sondern über die Angabe von Zielgeschwindigkeit und Dauer bis zum Erreichen dieser Zielgeschwindigkeit (bei gleichmäßigem Geschwindigkeitsabbau).

Dauer der Warnsignalausgabe wird auf 500 ms festgelegt und ist unabhängig von etwaigen Fahrerreaktionen während dieser Dauer. Wenn VF vor einer Kollision mit EF vollständig zum Stehen kommt, errechnen sich TH und TTC wie folgt:

$$TH = \frac{d_0}{v_{EF,0}} \quad (8.4)$$

$$TTC = \frac{s_{VF,1}}{v_{EF,0}} = \frac{2 \cdot d_0 + v_{VF,0} \cdot \Delta t}{2 \cdot v_{EF,0}} \quad (8.5)$$

Über geeignete Wahl der Parameter $v_{EF,0}$, $v_{VF,0}$, d_0 sowie Δt können somit die gewünschten Werte für TH und TTC erreicht werden. Es wird $v_{EF,0} = v_{VF,0} \approx v_{soll} = 80$ km/h angestrebt. Weiterhin wird $d_0 = 40$ m sowie $\Delta t = 1500$ ms gewählt, so dass sich TH=1800 ms und $TTC \approx 2500$ ms ergeben. Detaillierte Ausführungen zur Zusammensetzung menschlicher Reaktionszeiten sind bspw. in [Ben08] nachzulesen. In [Gre00] wird für die Bremsreaktionszeit auf unerwartete Ereignisse ein Wert von 1200 bis 1350 ms und für die Lenkreaktionszeit 1500 ms angegeben. Bei diesen Annahmen, die den Ergebnissen von [Ben08] zufolge als konservativ einzuschätzen sind, bleibt den Vpn in der vorliegenden Studie ausreichend Zeit, um eine Reaktion einzuleiten.

Zum Zeitpunkt der Initiierung des Kollisionsereignisses befand sich EF in einem Abstand von 40 m hinter VF. Beide fuhren mit ca. 80 km/h. VF führte eine Bremsung in den Stillstand aus, für die es 1500 ms benötigte. Die Ausgabe der haptischen Warnung erfolgte mit Beginn des Bremsvorgangs von VF und für eine feste Dauer von 500 ms. Bei ausbleibender Fahrerreaktion kam es ca. 2500 ms nach Beginn der Bremsung von VF zum Auffahrunfall.

Konkretisierung der Kollisionssituation

Um den eigentlichen Versuchszweck nicht offenzulegen gingen der Kollisionssituation mehrere Folgeszenarien voraus, in denen dem VF gefahrungsfrei gefolgt werden sollte. Ein Folgeszenario findet auf einer geraden dreispurigen Strecke der Länge 1500 m statt, die in der mittleren Spur befahren werden soll. Die Spurbreite aller drei Spuren beträgt konstant 3,8 m (s. Abb. 8.3 *links*). Streckenbegrenzungspfosten, die im Abstand von 50 m aufgestellt sind, sollen das Einschätzen des Abstandes zu VF erleichtern. Auf der linken und rechten Spur werden Absperungen in einem Abstand von 250 m aufgestellt, die im finalen⁵ Versuchsssetup hauptsächlich dazu dienen, die mittlere Spur als Sollspur zu kennzeichnen. VF steht zunächst an Streckenmeter 350 im Stillstand.

Die V_{pn} wurden gebeten, mit der durch die aufgestellten Geschwindigkeitsbegrenzungsschilder geltenden Geschwindigkeit normal auf das VF zuzufahren, welches die Geschwindigkeit an die von EF anpasst. Während des Annäherungsvorgangs wurden die V_{pn} in ihrer Geschwindigkeitwahl beobachtet und bei deutlichen Abweichungen durch den Versuchsleiter auf das Einhalten der Sollgeschwindigkeit hingewiesen. Aufgrund des unnatürlichen Setups waren derartige Korrekturen in den ersten Folgeszenarien häufig notwendig, jedoch sehr selten bei der finalen Folgesituation, aus der die Kollisionssituation entsteht.

Die beschriebene Anpassung der Geschwindigkeit von VF an EF erfolgt zweistufig. Bei einem Abstand $d_2 >$ zwischen EF und VF fährt letzteres ruckartig mit einer um 10 m/s langsameren Geschwindigkeit als EF an. Unterschreitet der Abstand den Wert d_1 , erhöht VF seine Geschwindigkeit auf einen um nur noch 5 m/s geringeren Wert als EF, um dessen Geschwindigkeit schließlich beim Sollabstand von d_0 zu übernehmen (s. Abb. 8.1). Die un stetigen Geschwindigkeitssprünge von VF sind für die

⁵Im ursprünglichen Versuchsssetup wurde in der Kollisionssituation zwischen einem Nutz- und einem Fehlerfall unterschieden. Während im Nutzfall ein signalisiertes Ausweichen in beide Richtungen möglich sein sollte, wurde dies im Fehlerfall durch die Mauern auf den Nebenspuren verhindert. Im finalen Versuchsssetup wurde nur noch der Nutzfall untersucht.

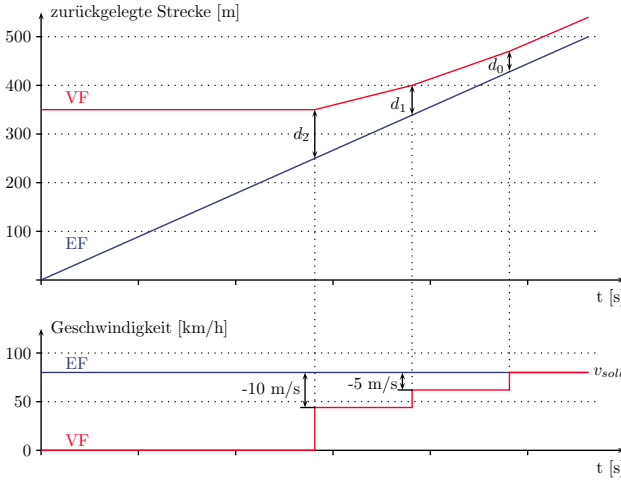


Abb. 8.1.: Annäherung im Folgeszenario:

Es wird beispielhaft ein Folgeszenario mit $v_{soll} = 80$ km/h und $d_0 = 40$ m dargestellt. EF fahre mit der konstanten Geschwindigkeit v_{soll} . VF befindet sich zunächst im Stillstand und passt die Geschwindigkeit dann an EF an. Diese Anpassung erfolgt diskret in zwei Stufen (10 bzw. 5 m/s Differenz zu v_{soll}), die abhängig vom Abstand zwischen VF und EF eingenommen werden. Die unstetigen Geschwindigkeitsübergänge sind für die Vpn in EF nicht wahrnehmbar.

Vpn nicht wahrnehmbar. Der Abstand d_2 liegt konstant bei 100 m, d_1 variiert mit dem Folgeabstand d_0 . Nach Erreichen von d_0 wurden die Vpn vom Versuchsleiter über Lautsprecher gebeten, den Abstand zu VF einzuschätzen und ihre empfundene Sicherheit bei der Folgefahrt mit diesem Abstand auf einer dreistufigen Skala ("eher sicher", "eher unsicher" oder „weder noch“) anzugeben.

Erreicht VF die Streckenposition 1050 m, so beschleunigt es bei einem Folgeszenario kontinuierlich auf eine für EF unerreichbare Geschwindigkeit (+20 m/s) und verschwindet aus dem Szenario. Bei einem Kollisionsszenario bremst VF bei Streckenmeter 1020 innerhalb von 1500 ms

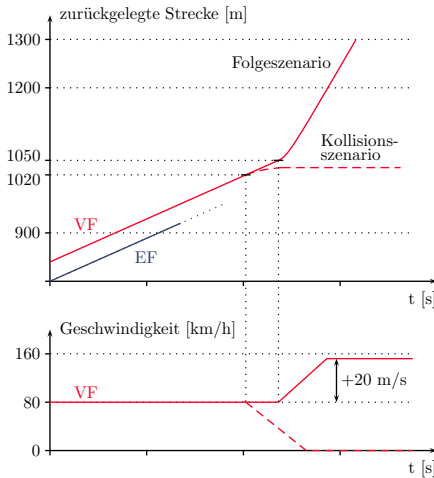


Abb. 8.2: Unterschied zwischen Folge- und Kollisionsszenario:

Im Folgeszenario (durchgezogene Linie) beschleunigt VF bei Streckenmeter 1050 auf eine für EF unerreichbare Geschwindigkeit (+20 m/s) und verschwindet aus der Szene. Im Kollisionsszenario (gestrichelte Linie) bremst VF bei Streckenmeter 1020 innerhalb von 1500 ms in den Stillstand.

in den Stillstand (s. Abb. 8.2). Der Beginn des Abbremsvorgangs im Kollisionsszenario unterscheidet sich vom Beginn des Beschleunigungsvorgangs im Folgeszenario, um mögliche antizipatorische Handlungen der Vpn aufgrund erkannter Regelmäßigkeiten zu unterbinden.

Für die Kollisionssituation wurden möglichst geringe Varianzen in $v_{EF,0}$, $v_{VF,0}$, d_0 und Δt und damit in den Zeitgrößen TH und TTC angestrebt. Die Dauer des Bremsmanövers Δt wird in der Szenarienbeschreibungssprache definiert und ist damit konstant, ebenso wie der Folgeabstand d_0 beim Auslösen des Kollisionsereignisses. $v_{VF,0}$ entspricht $v_{EF,0}$, welches durch die Vpn gewählt wird und kontrolliert werden muss. Durch die ausgeschilderte Geschwindigkeitsbegrenzungen auf $v_{soll} = v_{EF,0}$ wurden geringe Varianzen in $v_{EF,0}$ erwartet.

Es wurde zwischen Folge- und Kollisionsszenario unterschieden. Aufgabe der Vpn war zunächst das Einschätzen des Abstandes zu VF sowie die Bewertung der Sicherheit dieses Abstandes. Im Folgeszenario beschleunigte VF dann auf eine unerreichbare Geschwindigkeit, im Kollisionsszenario bremste es plötzlich in den Stand ab.

Gesamtzusammensetzung des Versuchsteils „Ausweichen“

Vor dem finalen Kollisionsszenario wurden vier Folgeszenarien mit unterschiedlichen Sollabständen und -geschwindigkeiten durchfahren, so dass fünf Folgesituationen entstehen (s. Tab. 8.1). Zwischen diesen wurden Füllszenarien eingeschoben, durch die das Gesamtszenario abwechslungsreicher gestaltet und die Wahrscheinlichkeit eines Spurabkommens erhöht wurde. Dadurch ist für die Vpn mit aktivem LDWS eine verstärkte Warngeschwindigkeit zu erwarten, durch die die Reiz-Reaktions-Zuordnung für das haptische Signal reaktiviert werden kann.

Die Füllszenarien weisen zu diesem Zweck einen kurvigen Streckenverlauf auf. Der erste Streckenabschnitt der Länge 500 m besteht aus einer dreispurigen Straße mit einer Spurbreite von jeweils 3,8 m, die in der mittleren Spur befahren werden soll. Im Bereich von 500 bis 600 m verengt sich diese Straße zu einem einspurigen Abschnitt der Breite 2,8 m, der sich über eine Länge von 300 m erstreckt. Im Anschluss wird die Straße über 100 m wieder zur ursprünglichen dreispurigen Straße mit Spurbreite 3,8 m aufgeweitet, die für weitere 500 m in der mittleren Spur befahren wird. Die Gesamtlänge eines Füllszenarios beträgt somit wiederum 1500 m. Sowohl die Verengung als auch die Aufweitung wird den Vpn durch Pylonen angezeigt. Es wurden zwei unterschiedliche Grundtypen von Füllszenarien eingesetzt, die sich durch die Kurvenrichtung unterscheiden. Die Kurvenkrümmungen des verengten Abschnittes

Tab. 8.1.: Folgesituationen: Abstände und Sollgeschwindigkeiten

Szenario	d_0 [m]	v_{soll} [km/h]
Folgeszenario 1	40	80
Folgeszenario 2	50	90
Folgeszenario 3	30	100
Folgeszenario 4	30	80
Kollisionsszenario	40	80

Tab. 8.2.: Kurvenkrümmung in der Verengung der Füllszenarien

Szenario	r [m]	$\kappa = 1/r$ [m ⁻¹]
Füllszenario 1	500	0,002
Füllszenario 2	333	-0,003
Füllszenario 3	250	0,004
Füllszenario 4	200	-0,005

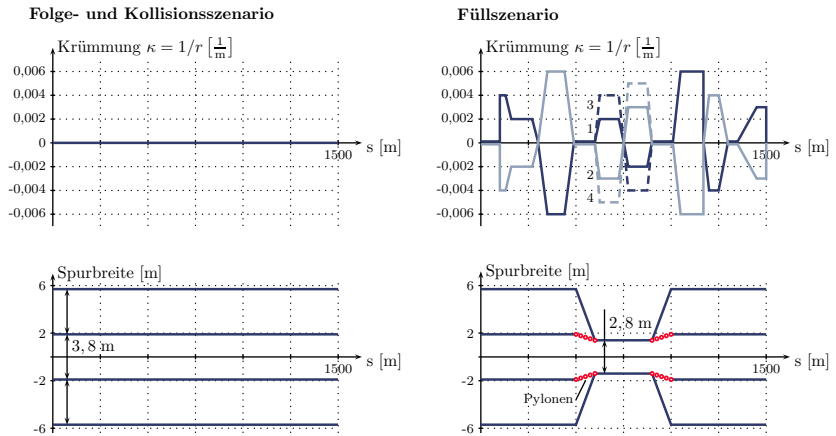


Abb. 8.3.: Folge-, Kollisions- und Füllszenarien:

Die Folge- und Kollisionsszenarien finden auf einer geraden dreispurigen Strecke mit Spurbreite 3,8 m statt (*links*). Dazwischen werden s. g. Füllszenarien durchfahren, die einen kurvigen Streckenverlauf aufweisen (*rechts*). Dabei wechselt die Kurvenrichtung nach jedem Füllszenario (vgl. Indizes 1-4). Innerhalb dieser Füllszenarien wird die Spur für 300 m auf 2,8 m verengt. Die Krümmung dieser Verengung nimmt mit jedem Füllszenario zu.

nehmen mit jedem Füllszenario zu (s. Tab. 8.2). In Abb. 8.3 (*rechts*) sind Krümmungs- und Spurbreitenverlauf der Füllszenarien dargestellt.

Integration in den Gesamtversuch

Zur Reduzierung des Akquise- und Datenerhebungsaufwands wurden in der Studie ebenfalls Fragen einer Dissertation zum Thema „Fahrspaß und Fahrkomfort“ untersucht. Basis ist hierbei das Modell zur Entstehung von Fahrspaß und Fahrkomfort durch den Einsatz von FAS, welches verschiedene Fahrhandlungen betrachtet ([EEK08], [EEA09b], [EEA09a]). Diese Fahrhandlungen werden nach intrinsisch sowie extrinsisch motivierten Handlungen unterschieden. Intrinsisch motivierte

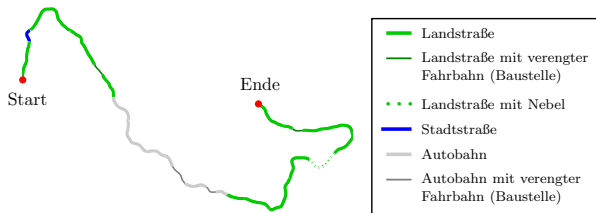


Abb. 8.4.: Versuchsteil „Spaß & Komfort“:

Im Versuchsteil „Spaß & Komfort“ führen die Vpn in einem abwechslungsreichen Szenario auf Stadt- und Landstraßen sowie Autobahn. An mehreren Stellen ist die Spur verengt, um eine Warngabe des LDWS (sofern aktiv) wahrscheinlicher zu machen. Der Hauptzweck des Versuchsteils bestand in der Konditionierung der Reiz-Reaktions-Zuordnung bei den Vpn mit LDWS.

Fahrhandlungen, die eine hohe Handlungsintensität aufweisen, führen demnach zur Entstehung von Fahrspaß, während deren Entzug Langeweile (Spaßmangel) zur Folge hat. Bei extrinsisch motivierten Handlungen führt eine hohe Intensität hingegen zu Diskomfort, während eine Reduktion der Intensität positiv erlebt wird (Komfort).

In der Studie sollten Vpn untersucht werden, welche die Fahrhandlungen „dem Straßenverlauf folgen“ sowie „Fahrspur halten“ gerne (intrinsisch motiviert) bzw. ungerne (extrinsisch motiviert) ausführen. Ein für die Studie entwickeltes FAS unterstützt Fahrer bei diesen Handlungen, indem es die Aufgaben der Fahrzeuglängsführung vollständig übernimmt. Das System erkennt geltende Geschwindigkeitsbegrenzungen und Vorderfahrzeuge und regelt Geschwindigkeiten und Abstände entsprechend den situativen Bedingungen. Die Fahrer übernehmen lediglich die Fahrzeugquerführung, wobei das FAS sie auf informatorischer Ebene durch die Ausgabe von Spurverlassenswarnungen unterstützt.

Den Vpn wurde vorab ein Vorfragebogen übermittelt, mit dem u. a. demografische Daten sowie Fahrerfahrung, Fahrstil und Händigkeit erhoben wurden (Anhang D.1). Beim Versuch durchfahren die Vpn zunächst ein Szenario der Länge 56 km, welches derart ausgelegt war,

dass häufige Eingriffe des FAS zu erwarten sind und dieses erlebbar wird (Versuchsteil „Spaß & Komfort“, Streckenverlauf s. Abb. 8.4). Im Anschluss wurden die Vpn zu Aspekten des empfundenen Fahrspaßes und -komforts befragt. Zudem bewerteten die Vpn mit FAS dieses System anhand des Fragebogens, der in der LDW-Studie zum subjektiven Vergleich haptischer Spurverlassenswarnsignale eingesetzt wurde (Anhang D.1). Für die Fragestellung der vorliegenden Arbeit bestand der Hauptzweck des Versuchsteils „Spaß & Komfort“ in der Konditionierung der Reiz-Reaktions-Zuordnung durch die Spurverlassenswarnung.

Nach der Befragung durchfuhren die Vpn den Versuchsteil „Ausweichen“, der aus der Aneinanderreihung der Folge- und Füllszenarien und dem abschließenden Kollisionsszenario zusammengesetzt ist (s. Abb. 8.5). Den Vpn mit aktivem Spurverlassenswarnsystem wurde zusätzlich im dritten Folgeszenario bei freier Fahrt (VF hat bereits beschleunigt) eine Falschwarnung präsentiert. Hierbei kommt es zur Warnsignalausgabe, obwohl aufgrund der Fahrsituation kein Spurverlassen droht. Der Versuchsteil und damit der gesamte Versuch endete unmittelbar nach der (ausbleibenden) Reaktion der Vpn in der Kollisionssituation. In der anschließenden Befragung wurden die Vpn danach gefragt, ob sie vor der Kollision haptisch, visuell oder akustisch gewarnt wurden (randomisierte Reihenfolge). Gaben die Vpn an, eine haptische Warnung gespürt zu haben, wurden sie im Folgenden zu Eigenschaften des Warnsignals befragt (Fragebögen s. Anhang D.1).

8.1.3. Versuchsplan

Die UV der Studie sind die Faktoren **Spurverlassenswarnung** (LDW) sowie **Kollisionswarnung** (FCW), für die jeweils ein between-subject Design mit den Abstufungen "keine Warnung“, „Warnung mit einseitiger Lenkradvibration“ (Signal 1) und „Warnung mit Lenkradrütteln mit Richtungsmoment“ (Signal 2). Letzteres wurde zusätzlich zur einseitigen Lenkradvibration gewählt, da es ebenfalls ein Rütteln bzw. Vibrieren mit einer Richtungsinformation kombiniert, durch den Einsatz einer EPS leicht im Fahrzeug umsetzbar ist, und zudem in der subjektiven

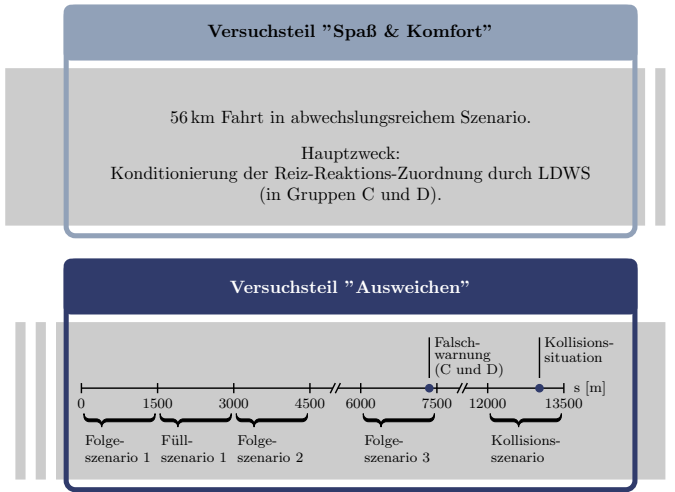


Abb. 8.5.: Gesamtzusammensetzung des Versuchs:

Der Versuch setzt sich aus den Versuchsteilen „Spaß & Komfort“ sowie „Ausweichen“ zusammen. In letzterem wurden abwechselnd Folge- und Füllszenarien vor dem finalen Kollisionsszenario durchfahren. Die Vpn mit aktivem LDWS erhielten im dritten Folgeszenario bei freier Fahrt zusätzlich eine Falschwarnung (Warnsignalausgabe ohne Spurverlassensgefahr).

Bewertung als Spurverlassenswarnsignal positiv abschneidet (s. Kapitel 7). Eine vollständige Kreuzung der beiden UV in 9 experimentelle Gruppen ist nicht notwendig, da für die relevante Ausweichsituation lediglich bestimmte Kombinationen untersucht werden sollen. Im Detail sind dies die in Abb. 8.6b dargestellten Gruppen A bis D.

Diese Gruppen gehen aus den experimentellen Bedingungen im Versuchsteil „Spaß & Komfort“ hervor. Hier wurden zwei Kohorten durch einen speziellen Vorfragebogen danach ausgewählt, ob die Vpn die Fahrhandlungen „dem Straßenverlauf folgen“ und „Fahrspur halten“ gerne bzw. ungerne ausführen. In jeder Kohorte fuhr die Hälfte der Vpn ohne

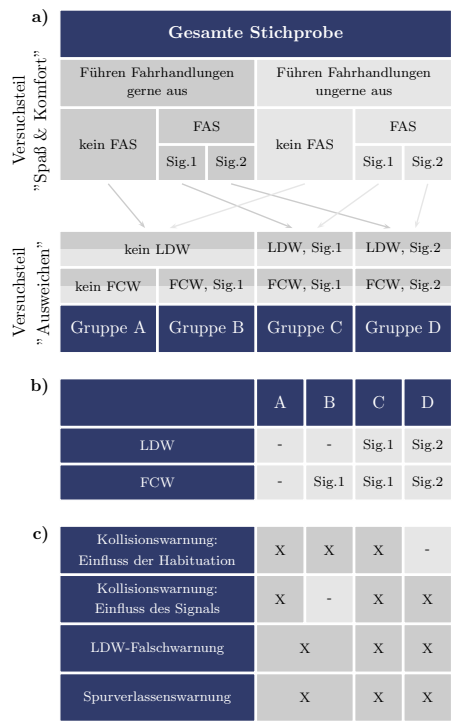


Abb. 8.6: Gruppen

a) Aufteilung der Vpn in die experimentellen Gruppen A bis D. Im Versuchsteil „Ausweichen“ sind in allen Untergruppen Gern- und Ungernfahrer gleich häufig vertreten; b) Ausprägungen der UV LDW und FCW in den Gruppen; c) Basis der Gruppenvergleiche zur Beantwortung der Forschungsfragen (FAS: autonome Fahrzeuglängsführung + LDW, LDW = Spurverlassenswarnung, FCW = Kollisionswarnung, Signal 1 = einseitige Lenkradvibration, Signal 2 = Lenkradrütteln mit Richtungsmoment).

Unterstützung und die andere Hälfte mit Unterstützung durch ein FAS, welches die Fahrzeuglängsführung übernahm. Für die Unterstützung auf der Ebene der Fahrzeugquerführung durch die Spurverlassenswarnung wurden die Signale 1 und 2 (s. o.) mit einer homogenen Verteilung eingesetzt. Die Aufteilung der Vpn ist in Abb. 8.6a dargestellt.

Im Versuchsteil „Ausweichen“ wurde zunächst unterschieden, ob die Vpn durch ein LDWS unterstützt werden oder nicht (UV LDW). Die Einteilung erfolgte entsprechend der Querführungsunterstützung im Versuchsteil „Spaß & Komfort“, so dass die Hälfte der Vpn keine Spurverlassenswarnung erhielt, während die andere Hälfte zu gleichen Teilen durch Signal 1 bzw. Signal 2 gewarnt wurde. Hierbei sowie bei der weiteren Aufteilung wurde darauf geachtet, dass in allen Untergruppen „Gern-

fahrer“ gleich häufig vertreten sind wie „Ungernfahrer“. Weiter wurde nach der Art der Unterstützung in der Kollisionssituation unterschieden (UV FCW). Die Vpn mit LDW erhielten ebenfalls eine Ausweichempfehlung, wobei das Warnsignal mit dem LDW-Signal identisch war. Von den Vpn ohne LDW erhielt die Hälfte keine Ausweichempfehlung, die andere Hälfte wurde durch Signal 1 gewarnt, wodurch die 4 experimentellen Gruppen A bis D entstehen (vgl. Abb. 8.6b).

Die vorgenommene Einteilung ermöglicht unterschiedliche Gruppenvergleiche. Bei der Betrachtung der Kollisionssituation wird der Einfluss der Habituation über den Vergleich der Gruppen A (keine Kollisionswarnung), B (unkonditionierte Warnung) und C (Warnung mit konditionierter Reiz-Reaktions-Zuordnung) bewertet. Weiterhin wird der Vergleich der Gruppen A (keine Kollisionswarnung), C (Warnung mit Signal 1) und D (Warnung mit Signal 2) herangezogen, um Unterschiede zwischen den Signalen aufzuzeigen (s. Abb. 8.6c). Effekte der Faktorausprägungen werden in der Kollisionssituation insbesondere in der AV **Reaktionsart** mit den Ausprägungen "keine Reaktion“, „Lenkreaktion“, „Bremsreaktion“ sowie „kombinierte Brems-Lenkreaktion“ erwartet (vgl. z. B. [Ben08], [KS09]). Diese müssen ggf. durch Reaktionszeiten (z. B. Lenkreaktionszeit) und -stärken (z. B. Lenkwinkelbeschleunigung) als weitere AV konkretisiert werden. Weiterhin werden subjektive Bewertungen der Warnsignale ausgewertet, die mithilfe eines Fragebogeninstruments erhoben wurden (Anhang D.1).

Für die Bewertung der Spurverlassenswarnung und der Fahrerreaktion auf die Falschwarnung werden die Gruppen A und B (keine Warnung) zusammengefasst und mit den anderen Gruppen verglichen, um wiederum Unterschiede zwischen den Signalen feststellen zu können (s. Abb. 8.6c). Als AV werden im Falle der Falschwarnung Fahrerreaktionen an den Stellelementen und deren Auswirkungen auf die Fahrzeugführung erhoben. Bzgl. der Wirkung der Spurverlassenswarnung werden die Spurverlassenshäufigkeit und -dauer als objektive AV sowie Bewertungen der Warnsignale auf einem Fragebogeninstrument als subjektive AV erhoben. Wiederum werden relevante KV über einen Vorbefragungsbogen erfasst (Fragebögen s. Anhang D.1).

8.1.4. Fragestellungen und Hypothesen

Der Fokus der Untersuchung liegt auf der Fahrerreaktion in der Kollisionssituation. Hierfür werden die folgenden Hypothesen⁶ aufgestellt:

Fahrerverhalten ohne Warnung

H.FCW.1a: Bei der drohenden Frontalkollision reagieren Fahrer eher mit einer Brems- als mit einer Lenkreaktion, auch wenn nur durch letztere die Kollision vollständig vermieden werden kann.

H.FCW.1b: Reagieren Fahrer mit einer Lenkreaktion und ist die Ausweichrichtung beliebig, dann weichen Fahrer eher nach links als nach rechts aus.

Fahrerverhalten mit Warnung

H.FCW.1c: Fahrer, die in der Kollisionssituation durch ein haptisches Signal in der Lenkung gewarnt werden, reagieren häufiger mit einer Ausweichreaktion als Fahrer, die nicht gewarnt werden.

H.FCW.1d: Fahrer, die vorab die Reiz-Reaktions-Zuordnung durch den Einsatz des haptischen Signals in der Lenkung als Spurverlassenswarnsignal erlebt haben, reagieren in der Kollisionssituation bei haptischer Warnung mit dem gleichen Signal häufiger mit einer Lenkreaktion als Fahrer, die das haptische Warnsignal zum ersten Mal erleben.

H.FCW.1e: Die Reaktionsart unterscheidet sich bei den beiden untersuchten Kollisionswarnsignalen nicht.

Bzgl. der Fahrerreaktion auf die Falschwarnung wird ein exploratives Vorgehen und vorab keine Hypothesen aufgestellt. Der Spurverlassenswarnung wird ganz allgemein ein positiver Effekt zugesprochen:

H.FCW.2: Die Spurverlassenswarnung hat einen objektiven Nutzen in der Spurverlassenssituation.

⁶Diese beziehen sich *explizit* auf die hier realisierte Kollisionssituation. Die Übertragbarkeit auf andere Kollisionssituation ist im Einzelfall zu prüfen.

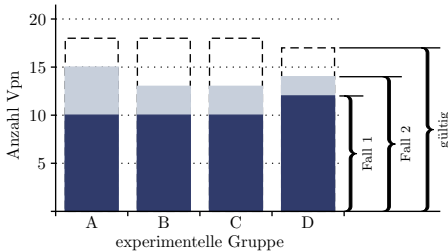


Abb. 8.7: Datenbasis und auswertbare Datensätze

Anzahl der gültigen und Anteil der in der Kollisionssituation auswertbaren Datensätze (Fallunterscheidung s. Text).

8.2. Ergebnisse

8.2.1. Datenbasis

Für den Versuch wurden in Summe 83 Vpn erhoben, wobei die ersten drei Vpn für die vorliegende Fragestellung als Vorversuchspersonen zu werten sind und nicht in die Auswertung mit einfließen. Von den 80 erhobenen Versuchsdatensätzen sind 71 Datensätze auswertbar⁷ (jeweils 18 in den Gruppen A bis C und 17 in Gruppe D, s. Abb. 8.7). Die Gruppen haben vergleichbare Zusammensetzungen bzgl. der Verteilung in Gern- und Ungernfahrer sowie bzgl. der Geschlechterverteilung (s. Tab. D.1 in Anhang D). Zwischen den experimentellen Gruppen bestehen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der KV (s. Tab. D.2 und D.3).

8.2.2. Reaktionen der Vpn in der Kollisionssituation

Kontrolle des kinematischen Zustands

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Fahrerreaktionen muss der kinematische Zustand zum Zeitpunkt der Auslösung der Kollisionssituation durch den Beginn der Bremsung von VF (im Folgenden auch verein-

⁷Bei 5 Vpn wurden Fahrerreaktionen bei einer unangebrachten Ausweichempfehlung untersucht (vgl. Fußnote 5 auf S. 143), was im Nachhinein als irrelevant eingestuft wurde. 3 Vpn brachen den Versuch nach dem ersten Versuchsteil aufgrund von Simulatorübelkeit ab. Bei einer Vp kam es zu einem starken Ruckeln in der Simulation unmittelbar vor der Kollisionssituation.

facht als „Ausweichzeitpunkt“ bezeichnet) kontrolliert werden. Die Vpn wurden aufgefordert, ihre Geschwindigkeit an die geltende Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h anzupassen. In die Auswertung fließen lediglich diejenigen Vpn mit ein, die diese Geschwindigkeitsanpassung auf 10% genau vornahmen (72 bis 88 km/h). Weiterhin wurde gefordert, dass die Vpn zum Ausweichzeitpunkt eine absolute Spurablage von weniger als 60 cm zur Spurmitte aufweisen. Ferner sollten die Vpn zum Ausweichzeitpunkt das Bremspedal nicht betätigen und einen Lenkwinkel zwischen -6° und $+6^\circ$ in Bezug auf die Nullposition aufweisen. Zusätzlich wurde die Gaspedalstellung zum Ausweichzeitpunkt kontrolliert, wenngleich diesbezüglich keine Voraussetzungen gemacht wurden.

Im weiteren Verlauf werden zwei Fälle unterschieden. Fall 1 betrachtet diejenigen Kollisionssituationen, in denen alle oben genannten kinematischen Voraussetzungen erfüllt werden, was bei 55 der 71 validen Datensätze zutrifft. Fall 2 betrachtet diejenige Untermenge, in denen die Vpn zusätzlich die Folgebedingung vor der Kollisionssituation als eher sicher einstufen, was bei 42 Vpn zutrifft (s. Abb. 8.7). Diese zusätzliche Eingrenzung wurde vorgenommen, um nicht nur objektiv sondern auch subjektiv ähnliche Voraussetzungen zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Fahrerreaktion zu erzielen. In Tab. D.4 und D.5 in Anhang D sind deskriptive Statistiken und Varianzanalysen der kinematischen Größen zum Ausweichzeitpunkt für beide Fälle zusammengefasst. Sofern nicht anderweitig gekennzeichnet, beziehen sich alle folgenden Auswertungen immer auf Fall 2.

Kontrolle der Habituation

Das für die vorliegende Studie relevante Unterscheidungsmerkmal der Gruppen B und C bzw. D ist die Konditionierung der Reiz-Reaktions-Zuordnung in letzteren durch den Einsatz des Signals als Spurverlassenswarnsignal. Dies macht die Kontrolle der Anzahl der Spurverlassensereignisse (LDE: *lane departure event*) erforderlich, da aufgrund dieser die erlebbare haptische Signalausgabe erfolgt. In Abb. 8.8 ist für jede der 22 Vpn der Gruppen C und D angegeben, wie häufig diese

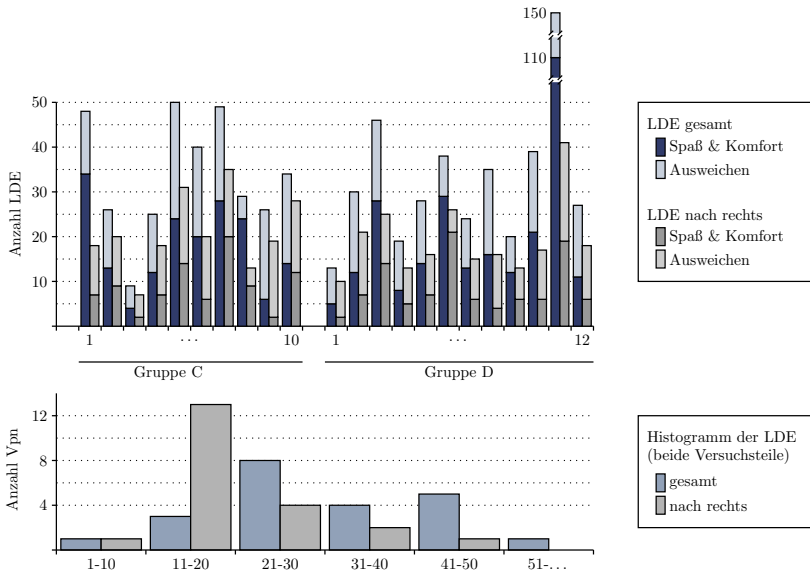


Abb. 8.8.: Anzahl der Spurverlassensereignisse:

Oben: Gesamtanzahl der Spurverlassensereignisse (LDE) sowie LDE nach rechts, aufgeteilt nach Vpn und Versuchsteil; *Unten:* Histogramme aller LDE sowie der LDE nach rechts bezogen auf den Gesamtversuch (Hinweis: lediglich Fall 2).

vor der Kollisionssituation durch das LDWS gewarnt wurde (aufgeteilt nach Versuchsteilen). Da in der Kollisionssituation ein Ausweichen nach links mit einem haptischen Signal angezeigt wurde, welches identisch mit dem Spurverlassenswarnsignal bei drohendem Spurabkommen nach rechts ist, werden LDE nach rechts in Abb. 8.8 gesondert betrachtet.

Im Mittel werden den Vpn 37 haptische Spurverlassenswarnungen dargeboten (Median=30, SD=28), wobei in mehr als der Hälfte der Fälle (M=20) ein Spurverlassen nach rechts erfolgt (Median=18, SD=8,2). Alle Vpn erhalten mindestens 9 Warnungen, wovon mindestens 7 LDE nach rechts erfolgen. In Abb. 8.8 sind die Histogramme der LDE für den gesamten Versuch dargestellt.

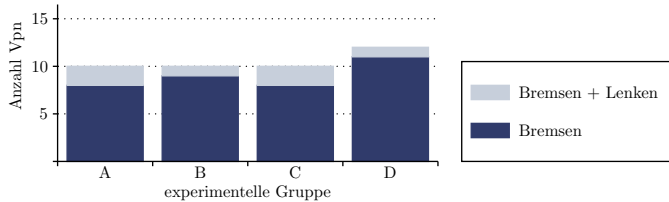


Abb. 8.9.: Reaktionen der Vpn in der Kollisionssituation:

Anzahl der reinen Bremsreaktionen sowie der kombinierten Brems-Lenkreaktionen, aufgeteilt nach experimentellen Gruppen (bei der unter Fall 2 beschriebenen Eingrenzung konnten keine reinen Lenkreaktionen beobachtet werden).

Reaktionsarten der Vpn

In Abb. 8.9 sind die Reaktionsarten der 42 Vpn in der Kollisionssituation dargestellt (s. auch Tab. D.6). Demnach kann bei allen Vpn eine Reaktion beobachtet werden. Von den 42 Vpn reagieren 36 mit einer reinen Bremsreaktion und 6 Vpn mit einer kombinierten Brems- und Lenkreaktion. Keine der in Fall 2 betrachteten Vpn⁸ versucht, der Kollision durch ein reines Ausweichmanöver zu entgehen. Zwischen den experimentellen Gruppen werden keine signifikanten Unterschiede beobachtet. In den 42 auswertbaren Kollisionssituationen kommt es in 40 Fällen tatsächlich zur Kollision mit dem bremsenden Vorderfahrzeug. Lediglich die beiden Vpn in Gruppe B und D, die zusätzlich zur Bremsreaktion lenkten, konnten der Kollision entgehen. In den restlichen 4 Fällen mit kombinierten Brems-Lenkreaktionen führte das begonnene Ausweichmanöver nicht zur kollisionsfreien Umfahrung des Hindernisses.

⁸Bei Betrachtung von Fall 1 (nicht dargestellt) kann eine reine Lenkreaktion bei einer Vp in Gruppe A festgestellt werden.

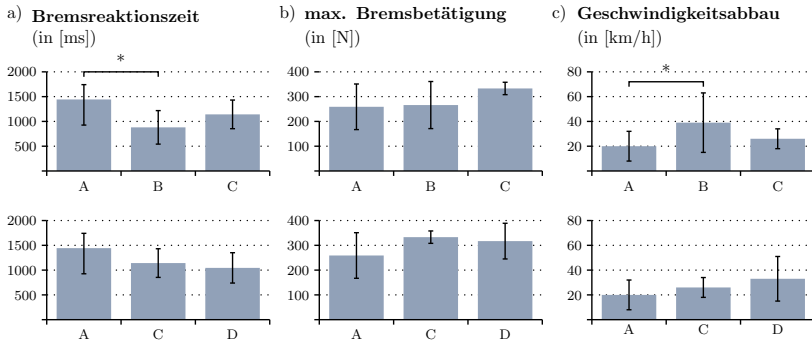


Abb. 8.10.: Beschreibung der Bremsreaktion:

jeweils oben: Einfluss der Habituation, jeweils unten: Einfluss des Signals; a) Bremsreaktionszeit zwischen der Auslösung der haptischen Warnung und einer Fahrerreaktion am Bremspedal; b) maximale Bremspedalbetätigung nach der Warngabe; c) Geschwindigkeit, die bis zum Zeitpunkt der Kollision abgebaut werden kann. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte sowie Standardabweichungen.

Beschreibung der Bremsreaktionen der Vpn

Es konnten lediglich 6 Lenkreaktionen (in Verbindung mit Bremsen) beobachtet werden, so dass eine detaillierte Betrachtung von Gruppenunterschieden in den Lenkreaktionen nicht zielführend ist. Stattdessen werden die Bremsreaktionen zwischen den experimentellen Gruppen verglichen, um Effekte der Habituation bzw. des Warnsignals zu identifizieren. Diese Reaktionen werden über die AV „Bremsreaktionszeit“ (Zeitdauer zwischen der Warngabe und einer messbaren Fahrerreaktion am Bremspedal), „maximale Bremspedalbetätigung“ (maximaler Betrag der Bremspedalbetätigung nach der Warngabe) sowie „Geschwindigkeitsabbau“ (Geschwindigkeitsabbau vom Beginn der Warnung bis zum Zeitpunkt der Kollision) operationalisiert (s. Abb. 8.10).

Eine haptische Kollisionswarnung am Lenkrad führt zu einer Reduktion der mittleren Bremsreaktionszeit (Gruppe A: $M = 1334$ ms, B: 880 ms,

C: 1142 ms, D: 1045 ms). Diese Effekte bestätigen sich im Median der Bremsreaktionszeiten innerhalb der Gruppen, der weniger sensitiv auf Ausreißer reagiert (s. Tab. D.7). Während diese Reduktion beim Vergleich der Gruppen A, C und D (Einfluss des Signals) statistisch nicht nachgewiesen werden kann, kann ein statistisch bedeutsamer Effekt ($p < .024$) beim Vergleich der Gruppen A, B und C (Einfluss der Habituation) mit Hilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse nachgewiesen werden (s. Tab. D.8). Ein post-hoc Tukey-Test (s. Tab. D.9) legt nahe, dass diese signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen A und B bestehen. Demnach reagieren Fahrer, die in der Kollisionssituation durch eine bis dahin unbekannte einseitige Lenkradvibration gewarnt werden, mit einer schnelleren Bremsreaktion als Fahrer, die nicht gewarnt werden.

Die kürzeren Bremsreaktionszeiten der Gruppen C und D gegenüber A können zwar statistisch nicht belegt werden, was allerdings auf die geringe Stichprobengröße zurückzuführen ist. Mit einem Reaktionsvorteil von 200 bis 300 ms sind die Bremsreaktionszeitverkürzungen ebenfalls beachtlich. Bei der gefahrenen Geschwindigkeit von ≈ 80 km/h werden bspw. in 250 ms knapp 5,5 m zurückgelegt.

Bezüglich der maximalen Bremspedalbetätigung zeigen sich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Tendenziell bremsen die Vpn in den Gruppen C und D stärker als die Vpn in den Gruppen A und B. Den maßgeblichen Einfluss auf die Geschwindigkeitsreduktion durch das Bremsmanöver hat nicht die Stärke der Bremsbetätigung, sondern deren Schnelligkeit. Während die Vpn in Gruppe A ihre Geschwindigkeit im Schnitt um lediglich 20 km/h reduzieren, erreichen die Vpn in Gruppe B eine mittlere Reduktion um 39 km/h. In Gruppe D werden im Mittel 33 km/h und in Gruppe C immerhin noch 26 km/h an Geschwindigkeit abgebaut. Bezüglich des Einflusses der Habituation können statistisch signifikante Differenzen beobachtet werden ($p < .033$), die durch die Unterschiede der Gruppen A und B entstehen. Die Warnung mit dem unbekannten Warnsignal führt dazu, dass die Vpn ihre Geschwindigkeit bis zur Kollision im Vergleich zu den nicht gewarnten Vpn signifikant stärker reduzieren können.

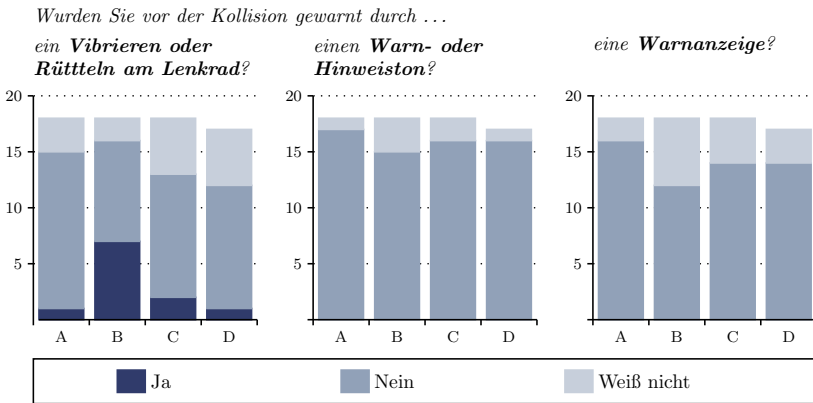


Abb. 8.11.: Wahrnehmung des haptischen Warnsignals:

Nach der Kollisionssituation wurden die Vpn gefragt, ob sie haptisch, akustisch oder visuell vor der drohenden Kollision gewarnt wurden. Eine akustische oder visuelle Warnung wurde nie gegeben, die Vpn der Gruppen B bis D wurden haptisch gewarnt (ausgewertet werden alle 71 gültigen Datensätze).

Subjektive Bewertung der haptischen Ausweichempfehlung

Im Anschluss an die Kollisionssituation, die zumeist zu einem Auffahren auf das Vorderfahrzeug führte, wurden die Vpn gefragt, ob Sie haptisch, visuell oder akustisch vor der Kollision gewarnt wurden. Die Reihenfolge der Fragen wurde dabei randomisiert. In keinem Fall kam es vor der Kollision zu einer akustischen oder visuellen Warnung, eine haptische Warnung wurde jedoch allen Vpn der Gruppen B bis D dargeboten. Die Antwortverteilung der Vpn ist in Abb. 8.11 dargestellt.

Keine der Vpn gab an, vor der Kollisionssituation durch ein visuelles oder akustisches Signal gewarnt worden zu sein. Während ca. 90% der Vpn angaben, keinen Warnton gehört zu haben (10% waren sich nicht sicher), sank die Sicherheit bei der visuellen Warnanzeige auf ca. 79% (hier waren sich 21% der Vpn nicht sicher). Bezüglich der haptischen Warnung kann ein falsch positiver Fall beobachtet werden. Eine Vp in

Gruppe A ohne haptische Warnung gab an, spürbar am Lenkrad gewarnt worden zu sein. Auffällig ist insbesondere die hohe Anzahl falsch negativer Einschätzungen. 31 der 53 Vpn in den Gruppen B bis D wurden nach eigenen Angaben nicht haptisch gewarnt, weitere 12 Vpn waren sich diesbezüglich nicht sicher. Lediglich 10 Vpn spürten die haptische Warnung am Lenkrad, davon allein 7 in Gruppe B, wo das Warnsignal in der Kollisionssituation zum ersten Mal ausgegeben wurde.

Alle 11 Vpn, die angaben, haptisch vor der Kollision gewarnt worden zu sein, wurden im Anschluss u. a. nach der Richtungsinformation im haptischen Signal befragt. Der Meinung von 6 Vpn zufolge enthielt das Warnsignal keine Richtungsinformation, 3 Vpn waren sich nicht sicher. Lediglich zwei Vpn gaben an, eine Richtungsinformation gespürt zu haben. Diese Richtungsinformation deutete nach Meinung einer Vp nach links und nach Meinung der anderen nach rechts. Bezüglich der weiteren in der Befragung erhobenen subjektiven Angaben, insbesondere der Bewertung der Signaleigenschaften mithilfe des semantischen Differentials (vgl. Nachbefragungsbogen in Anhang D.1), wird eine detaillierte Auswertung als nicht sinnvoll erachtet.

8.2.3. Reaktionen der Vpn auf die Falschwarnung

Bei der Falschwarnung in den Gruppen C und D kommt es zu einer Spurverlassenswarnauslösung, ohne dass tatsächlich die Gefahr des Abkommens von der Spur besteht. Diese Warnung wird in Folgeszenario 3 ausgelöst, nachdem sich das Vorderfahrzeug entfernt hat und die Vpn auf freier gerader Strecke selbstbestimmt fahren können. Keine Vp befindet sich zum Auslösezeitpunkt in unmittelbarer Nähe zum Spurrand. Die Warnausgabe erfolgt für eine feste Dauer von 2 s.

Zur Beurteilung des Einflusses der Falschwarnung auf die Vpn werden deren Reaktionen an den Stellelementen Lenkrad, Gas- und Bremspedal sowie die Wirkungen dieser Reaktionen auf die Fahrzeugquer- bzw. -längsführung mit den Vpn der Gruppen A und B verglichen, die zur

Kontrollgruppe ohne Falschwarnung zusammengefasst werden. Ausgewertet wird das 2 s andauernde Zeitintervall der Warnausgabe sowie die Reaktionen und Wirkungen innerhalb von 2 s nach der Warnausgabe. Bei späteren Reaktionen, die damit mehr als 4 s nach Beginn der Warnausgabe stattfinden, wird keine primäre Ursache in der haptischen Warnung angenommen.

Reaktionen bezüglich der Fahrzeugquerführung

Die Beurteilung der Probandenreaktion bezüglich der Fahrzeugquerführung erfolgt anhand der Auswertung der Aktivität am Lenkrad durch die Integration der Lenkrate $\dot{\delta}$ über die 2 s-Intervalle während und nach der Warnung. In Abb. 8.12a ist die Aktivität am Lenkrad für die einzelnen experimentellen Gruppen dargestellt. Demnach kann durch die haptische Falschwarnung eine erhöhte Lenkaktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet werden, die sich als statistisch hoch signifikant herausstellt (s. Tab. D.11 in Anhang D). Mithilfe eines post-hoc Tukey-Tests wurden die Gruppen ermittelt, die für das signifikante Ergebnis der Varianzanalyse verantwortlich sind (s. Tab. D.12). Die Lenkaktivität bei der Falschwarnung mit der einseitigen Lenkradvibration (Gruppe C) ist demnach signifikant höher als die Lenkaktivität der Kontrollgruppe, sowohl während ($p < .042$) als auch nach der Warnung ($p < .003$). Beim Lenkradrütteln mit Richtungsmoment (Gruppe D) ergibt sich während ($p < .001$) und nach der Warnung ($p < .001$) sogar eine hoch signifikant höhere Lenkaktivität im Vergleich zur Kontrollgruppe. Weiterhin sind zwischen den Gruppen C und D während der Warnung hoch signifikante ($p < .001$) und nach der Warnung immerhin noch signifikante ($p < .044$) Differenzen zu beobachten, mit jeweils höheren Lenkaktivitäten in Gruppe D. Hierbei ist anzumerken, dass die erhöhte Lenkaktivität in Gruppe D auch durch den direkten Eingriff des Warnsignals in die Lenkung erklärt werden kann. Es ist jedoch nicht möglich, den Signalanteil an der Lenkaktivität vom Fahreranteil zu trennen, da der tatsächliche Einfluss des Warnmomentes auch durch die Fahrergriffkraft beeinflusst wird.

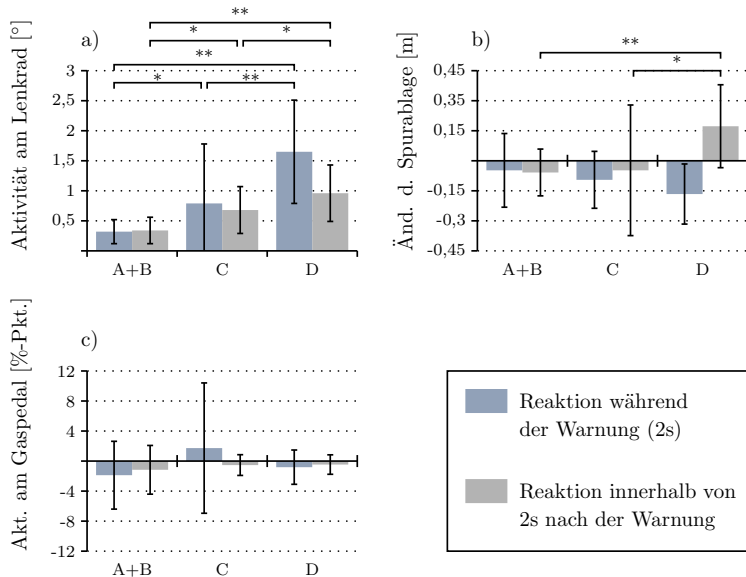


Abb. 8.12.: Reaktionen der Vpn auf die Falschwarnung:

a) Aktivität am Lenkrad (Integral über die Lenkrate), b) Änderung der Spurbalage (in m, negative Änderung = laterale Bewegung nach links), c) Aktivität am Gaspedal (Integral der Änderung der Gaspedalstellung), während sowie innerhalb von 2 s nach der Warntausgabe.

Es wird untersucht, ob die erhöhte Lenkaktivität einen messbaren Einfluss auf die Trajektorie hat. Hierzu wird die Änderung der Spurbalage des Fahrzeugmittelpunkts während sowie innerhalb von 2 s nach der Warnung ausgewertet (s. Abb. 8.12b). Über eine einfaktorielle Varianzanalyse können hoch signifikante Unterschiede zwischen den experimentellen Gruppen für das Zeitintervall nach der Warnung nachgewiesen werden (s. Tab. D.11). Ein post-hoc Tukey-Test identifiziert die Gruppe D als ausschlaggebend hierfür (s. Tab. D.12). Demnach führt das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment im Vergleich zur Kontrollgruppe zu einer hoch signifikant ($p < .001$), und im Vergleich zu Gruppe C mit

der einseitigen Lenkradvibration zu einer signifikant ($p < .007$) größeren Änderung der Spurablage. Die mittlere Änderung der Spurablage in Gruppe C unterscheidet sich hingegen trotz der signifikant höheren Lenkaktivität nicht statistisch bedeutsam von der der Kontrollgruppe.

Interessant ist insbesondere die Änderung der Spurablage in Gruppe D. Während der Warnung wirkt ein Richtungsmoment nach links, das zu einer lateralen Verschiebung des Fahrzeugs nach links (negative Änderung der Spurablage) führt. Nach der Warnung kommt es zu einer Korrektur durch die Vpn, die das Fahrzeug wieder nach rechts steuern.

Reaktionen bezüglich der Fahrzeuglängsführung

Nachdem in der Kollisionssituation ein Einfluss der haptischen Ausweichempfehlung am Lenkrad auf die Bremsreaktion festgestellt werden konnte (vgl. Abschnitt 8.2.2), wird untersucht, ob auch die Falschwarnung einen Einfluss auf die Fahrzeuglängsführung hat. Bewertet wird hierzu die Aktivität am Gaspedal, indem die Änderung der Gaspedalstellung über die 2s-Intervalle während und nach der Warnung integriert wird. Diese Aktivität am Gaspedal ist in Abb. 8.12c) dargestellt.

Es können sowohl in den Gruppen mit haptischer Falschwarnung am Lenkrad als auch in der Kontrollgruppe keine nennenswerten Aktivitäten am Gaspedal festgestellt werden, was durch einfaktorielle Varianzanalysen belegt wird (s. Tab. D.11). Im Median ergibt sich in allen Gruppen über die untersuchten Intervalle eine Gaspedalstellungsänderung von 0 (s. Tab. D.10). Weiterhin betätigt keine der Vpn innerhalb von 4 s nach Beginn der Warnsignalausgabe das Bremspedal. Es kann somit festgehalten werden, dass die haptische Falschwarnung des LDWS am Lenkrad keinen Einfluss auf die Fahrzeuglängsführung hat.

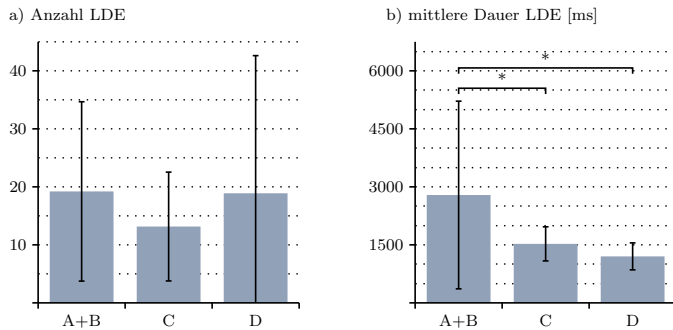


Abb. 8.13.: LDE im Versuchsteil „Spaß & Komfort“:

a) Anzahl der Spurverlassensereignisse; b) mittlere Spurverlassensdauer. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert sowie die Standardabweichung.

8.2.4. Objektive Wirkung und subjektives Erleben der Spurverlassenswarnung

Die Wirkung der Spurverlassenswarnung wird lediglich für den Versuchsteil „Spaß & Komfort“ ausgewertet, da dieser natürlicher gestaltet ist, als das künstliche Szenario im Versuchsteil „Ausweichen“. Zur Objektivierung der Querführungsgüte wird die Anzahl der LDE ausgewertet, die in den Gruppen C und D zur Ausgabe der haptischen Warnung führen (vgl. Abb. 8.13a). Es kann hier kein positiver Einfluss des Spurverlassenswarnsystems festgestellt werden (s. auch Tab. D.13 und D.14). Demnach führt das LDWS nicht zu einer messbaren Verbesserung der Querführungsgüte hinsichtlich der Anzahl der LDE.

In der Detailbetrachtung wird ersichtlich, dass einige Vpn bspw. durch „schlängelndes“ Fahren oder antizipatorisches Kurvenschneiden gezielt eine Warnauslösung forcieren (s. Abb. 8.13). Aufgrund der daraus resultierenden geringen Aussagekraft der Wirkung der Spurverlassenswarnung auf die allgemeine Fahrzeugquerführungsgüte wird die Betrachtung weiterer Gütemaße nicht als sinnvoll erachtet. Weiterhin wird festgestellt, dass es aufgrund der autonomen Fahrzeuglängsführung in den

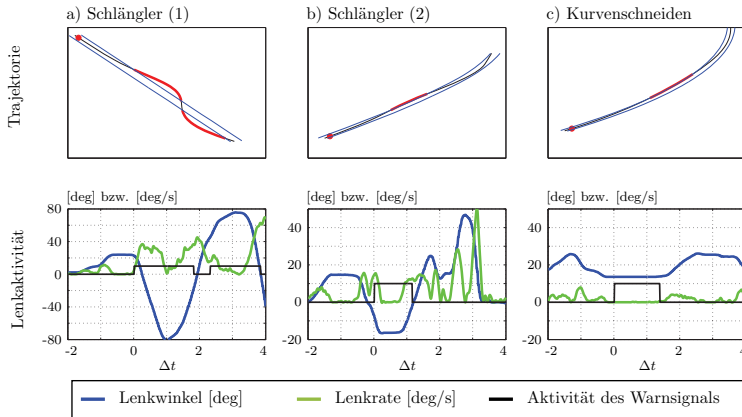


Abb. 8.14.: Gezielte Warmauslösung:

Betrachtung ab 2 s vor Warmauslösung. In der Trajektorie (oben) markiert der rote Punkt den Startpunkt, der rote Bereich den Bereich des Spurverlassens. Die unteren Diagramme zeigen Lenkwinkel und Lenkrate der Situation: a) und b) „Schlängler“, c) antizipatorisches „Kurvenschneiden“.

Gruppen C und D im Vergleich zur manuellen Längsführung in den Gruppen A und B nicht zulässig ist, LDW als alleinigen Faktor etwaiger Veränderungen in der Fahrzeugführungsgüte zu deklarieren.

Ein erwarteter Einfluss der Spurverlassenswarnung kann hinsichtlich der Kritikalität der LDE beobachtet werden, die über die Spurverlassensdauer operationalisiert wird. Diese ist in den gewarnten Gruppen C und D signifikant kürzer ($p < .035$ bzw. $p < .007$) als in der Kontrollgruppe ohne LDWS, während die Unterschiede zwischen den Gruppen C und D statistisch nicht bedeutsam sind (vgl. Abb. 8.13b sowie Tab. D.13, D.14 und D.15 in Anhang D). Während sich die Vpn in der Kontrollgruppe zum Teil über einen längeren Zeitraum am Spurrand aufhalten (ohne tatsächlich von der Spur abzukommen), wird dies in den Gruppen C und D sofort durch die haptische Warmausgabe signalisiert, die ein Zurücklenken in Richtung der Spurmitte bewirkt.

Um Effekte des Warnsignals durch den Vergleich der Gruppen C und D zu ermitteln, müssen *Fahrerreaktionen* betrachtet werden, die durch die Warnsignalausgabe initiiert werden. Hierbei ist das gezielte Auslösen von Warnungen durch die Fahrer problematisch, da diese Lenktätigkeiten geplant und nicht reaktiv erfolgen. Es wird der Versuch unternommen, durch Filterung diejenigen LDE zu ermitteln, in denen ein allein durch das Warnsignal bedingtes Reagieren der Fahrer wahrscheinlich erscheint. Zunächst werden hierzu alle LDE mit einer Warndauer < 150 ms gefiltert, da hier das Warnsignal nicht ursächlich für korrigierende Fahrmanöver gesehen wird. Eine Warndauer > 4000 ms wird als ausbleibende Fahrerreaktion gewertet und ebenfalls gefiltert. Weiterhin werden „Schlängler“ anhand der Auslösung mehrerer Warnungen in kurzer zeitlicher Folge (z. B. Abb. 8.14a) oder anhand einer deutlichen und nicht durch den Spurverlauf bedingten Lenkaktivität unmittelbar vor der Warnung bewertet (z. B. Abb. 8.14b). Als Anzeichen für antizipatorisches Kurvenschneiden wird ein Rückkehren auf die Spur trotz ausbleibender Lenkhandlung während der Warnsignalausgabe angesehen (z. B. Abb. 8.14c), wonach diese LDE ebenfalls gefiltert werden.

Von den ursprünglichen 1325 LDE im Versuchsteil „Spaß & Komfort“ verbleiben nach dieser Filterung nur noch 73 LDE, davon 19 in Gruppe C und 54 in Gruppe D. Eine Prüfung aller gefilterten sowie verbliebenen LDE nach Augenmaß kann keine offensichtlichen Falsch- oder Fehlbewertungen der Filteralgorithmen feststellen. Dennoch kann anhand der vorliegenden Daten nicht abschließend sichergestellt werden, dass die Fahrerreaktionen in den verbleibenden Fällen tatsächlich erst durch das Warnsignal initiiert werden und nicht geplant sind. Sollte dies der Fall sein, kann anhand der deutlich geringeren Anzahl an ungeplanten Spurverlassensereignissen in Gruppe C (19) im Vergleich zu Gruppe D (54) ein Vorteil der einseitigen Lenkradvibration bei der Wirkung des Warnsignals auf die Fahrzeugführung festgehalten werden.

Weiterhin wird festgestellt, dass durch den korrektiven Lenkeingriff des Warnsignals „Lenkradrütteln mit Richtungsmoment“ in Gruppe D keine strikte Trennung zwischen fahrer- und systembedingten Anteilen im Lenkverhalten vorgenommen werden kann. Aus diesem Grund wird der

Effekt der Spurverlassenswarnsignale nicht anhand der (Fahrer-) Reaktionszeit sondern anhand der Auswirkungen auf die Situationskritikalität bewertet, die durch die Spurverlassensdauer und die maximale Spurablage objektiviert wird (vgl. auch [BCLM98], [KPB⁺06], [NMH⁺06], [SGK⁺98], [SJ03]). In den 73 Restfällen beträgt die mittlere Spurverlassensdauer sowohl in Gruppe C als auch in Gruppe D exakt 1266 ms. Die mittlere maximale Spurablage in den Restfällen ist mit 143 mm in Gruppe D im Vergleich zu 123 mm in Gruppe C etwas höher, statistisch sind diese Unterschiede jedoch nicht belegbar.

Die subjektive Wahrnehmung des Spurverlassenswarnsignals wurde in den Gruppen C und D nach der Versuchsphase „Spaß & Komfort“ mit demselben Fragebogeninstrument erhoben, das auch in der LDW-Studie (Kap. 7) zum Einsatz kam (s. Anhang D.1). Wie die deskriptiven Statistiken in Tab. D.16 und D.18 in Anhang D zeigen, wird in der vorliegenden Studie im Gegensatz zur LDW-Studie selten der gesamte Bereich der Skalen genutzt. Hinsichtlich der erhobenen Eigenschaften und Merkmale können keine statistisch bedeutsamen Unterschiede zwischen den beiden Signalvarianten in den Gruppen C und D festgestellt werden (s. Tab. D.17 und D.19, Anhang D). In den Abb. 8.15 und 8.16 sind die Mittelwerte der Einzelbeurteilungen der Vpn dargestellt. Es sei angemerkt, dass hinsichtlich dieser subjektiven Bewertung dem *relativen* Vergleich *aller* Warnsignale in der LDW-Studie mehr Bedeutung beigemessen wird, als der *absoluten* Bewertung *eines* Warnsignals in der FCW-Studie, weshalb die Ergebnisse der subjektiven Bewertung hier lediglich aus Gründen der Vollständigkeit angegeben sind, jedoch nicht weiter interpretiert werden.

8.3. Diskussion der Methoden und Ergebnisse

Für die Forschungsfrage dieser Arbeit lag der Hauptzweck des Versuchsteils „Spaß & Komfort“ in der Konditionierung der Vpn. Durch das Auslösen von Spurverlassenswarnungen sollten die Vpn die Reiz-Reaktions-Zuordnung erlernen, was in der Kollisionssituation zu einer Ausweich-

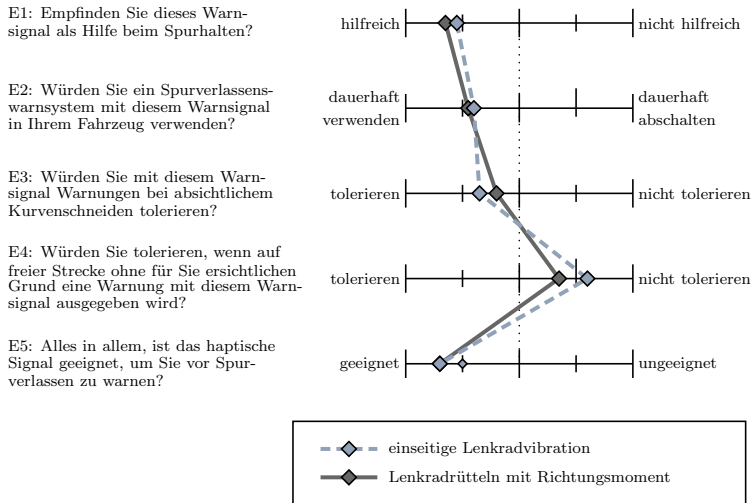


Abb. 8.15.: Eigenschaften der Spurverlassenswarnsignale:

Bewertung der Signale hinsichtlich verschiedener Kriterien (Mittelwert der Einzelbewertungen der Vpn).

reaktion führen sollte. Die in diesem Versuchsteils primär untersuchte Fragestellung einer weiteren Dissertation macht es erforderlich, dass die Vpn in den Gruppen mit FAS bereits vor Versuchsbeginn über die Präsenz des LDWS ebenso in Kenntnis gesetzt wurden, wie über die autonome Fahrzeuglängsführung. Zum einen macht dies das Auftreten und Messen naiver Fahrerreaktionen beim Erstkontakt mit der Spurverlassenswarnung unmöglich. Zum anderen wird durch diese Aufklärung ein exploratives Fahrverhalten in Kauf genommen, in dem die Vpn Warmauslösungen gezielt forcieren um das Signal zu erleben⁹. Dies gilt sowohl für den Versuchsteil „Spaß & Komfort“ als auch für den anschließenden Versuchsteil „Ausweichen“. Damit kann lediglich festgestellt werden, dass sich ein positiver Effekt der Spurverlassenswarnung in einer

⁹Die Tatsache, dass für die Versuche lediglich solche Vpn akquiriert wurden, die vorab keine Erfahrung im Umgang mit LDWS sammeln konnten, verstärkt dieses aktive Auslösen und Erleben vermutlich noch.

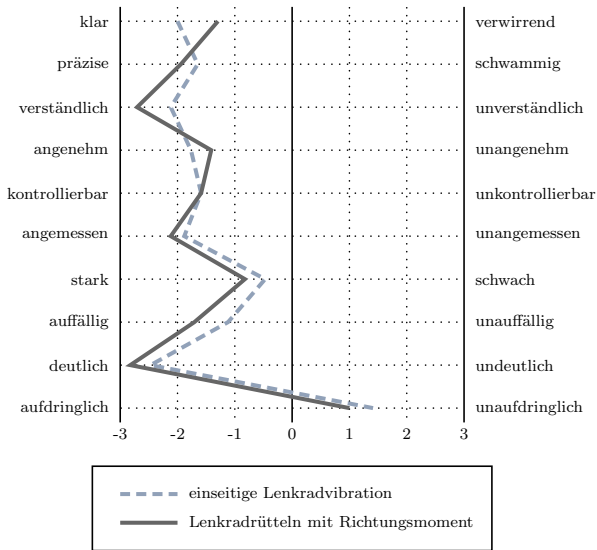


Abb. 8.16.: Merkmale der Spurverlassenswarnsignale:

Profilplot der haptischen Warnsignale auf den mit dem semantischen Differential untersuchten Merkmalen.

Reduktion der mittleren Spurverlassensdauer zeigt, so dass Hypothese H.FCW.2 nicht abgelehnt wird. Eine darüber hinausgehende detaillierte Auswertung der objektiven Wirkung der Spurverlassenswarnung ist aufgrund des gewählten methodischen Vorgehens nicht möglich. Der Hauptzweck der Konditionierung der Reiz-Reaktions-Zuordnung kann mit einer mittleren Anzahl von 37 Warndarbietungen vor der Kollisionssituation in den Gruppen mit LDW jedoch als erfüllt angesehen werden, so dass die eingeschränkte Aussagekraft bzgl. der Spurverlassenswarnung nicht als methodischer Mangel angesehen wird.

Die Ergebnisse der Auswertung der Fahrerreaktion auf die Falschwarnung sind vielversprechend. Zunächst kann eine signifikant erhöhte Lenkaktivität in den Gruppen C und D im Vergleich zur Kontrollgruppe beobachtet werden, die in Gruppe C mit der einseitigen Lenkradvibra-

tion alleine durch die Vpn aufgebracht wird. In Gruppe D zeigt sich während und nach der Ausgabe des Lenkradrüttelns mit Richtungsmoment eine hoch signifikant erhöhte Lenkaktivität. Während der Warnsignalausgabe wird diese auch durch das synthetisch generierte Lenkmoment erzeugt, wobei System- und Fahreranteil zwar nicht abschließend zu trennen sind, jedoch keine unverhältnismäßigen Lenkreaktionen der Vpn festgestellt werden können. Hierbei bewirkt das Richtungsmoment eine signifikante Änderung der Spurbablage des Fahrzeugs um im Mittel 15 cm nach links (gemäß dem Eingriff des Richtungsmomentes). Diese Spurbablage wird anschließend durch die Vpn korrigiert, was die hoch signifikante Lenkaktivität erklärt, die dann alleine durch die Vpn aufgebracht wird. Positiv ist insbesondere die Wirkung der Falschwarnung bei der einseitigen Lenkradvibration. Diese hat trotz der erhöhten Lenkaktivität keinen statistisch nachweisbaren Einfluss auf die Spurbablage des Fahrzeugs. In beiden Gruppen C und D hat die Falschwarnung zudem keine messbaren Auswirkungen auf die Fahrzeuglängsführung.

Bei der Falschwarnung handelt es sich per Definition um eine Warnausgabe in einer Situation, die aufgrund der mangelnden Kritikalität eigentlich keiner Warnung bedarf. In der vorliegenden Studie war die Situation bei der Auslösung der Falschwarnung allgemein und nicht nur hinsichtlich der Spurverlassensgefahr unkritisch. Das Ausbleiben einer Fahrerreaktion kann auch Ergebnis einer bewussten Handlungsentscheidung der Fahrer sein, die aufgrund der Falschwarnung eine Bewertung der Situationskritikalität vornehmen, und in der Folge nicht reagieren. Die ausbleibende Fahrerreaktion bei der Falschwarnung ist somit uneingeschränkt positiv zu werten, und erlaubt keine Schlüsse auf die Fahrerreaktion in der tatsächlich kritischen Kollisionssituation.

Von primärem Interesse ist das Fahrerverhalten in der Kollisionssituation, die Wirkung der haptischen Warnung sowie der Einfluss der Habituation auf diese Wirkung. Bei der Betrachtung der Kontrollgruppe kann Hypothese H.FCW.1a bestätigt werden. Demnach reagieren die Vpn zumeist mit einer reinen Bremsreaktion, wodurch zwar die Folge der Kollision gemindert, diese aber nicht vollständig verhindert wird. Wenngleich in den beiden Fällen einer kombinierten Brems-Lenkreaktion die

Ausweichreaktion nach links gerichtet war, kann hieraus keine allgemeine Dominanz dieser Ausweichrichtung abgeleitet werden. Hypothese H.FCW.1b wird zwar nicht verworfen, kann auf Basis der vorliegenden Ergebnisse allerdings nicht als bestätigt angesehen werden.

Da in keiner der Gruppen B bis D ein Effekt der haptischen Warnung auf die Reaktionsart beobachtet werden kann, müssen die Hypothesen H.FCW.1c und H.FCW.1d verworfen werden. Demnach führt eine haptische Signalisierung am Lenkrad in der vorliegenden Kollisionssituation nicht zu der erwarteten Erhöhung der Anzahl der Ausweichreaktionen, unabhängig davon, ob die Reiz-Reaktions-Zuordnung vorab durch den Einsatz des Signals als LDW-Signal erlernt werden konnte oder nicht. Es kann jedoch ein Einfluss der haptischen Warnung am Lenkrad auf die Bremsreaktionszeiten der Vpn festgestellt werden, der zudem vom Grad der Konditionierung abhängt. Demnach reagieren gewarnte Vpn mit einer schnelleren Bremsreaktion als die ungewarnten Vpn der Kontrollgruppe. Die Bremsreaktionszeit wird sogar noch weiter verkürzt, wenn die Vpn das Warnsignal in der Kollisionssituation zum ersten Mal erleben. Hierbei stellen sich trotz der geringen Stichprobe signifikante Leistungsverbesserungen im Vergleich zur Kontrollgruppe ein.

Unerwartete Resultate ergeben sich bei der Wahrnehmung der haptischen Warnung in der Kollisionssituation, welche lediglich zu 19% bewusst¹⁰ wahrgenommen wird. Hier lohnt sich eine detaillierte Analyse, nach der festgestellt wird, dass in den 42 auswertbaren Datensätzen, in denen die kinematischen sowie subjektiven Bedingungen erfüllt sind, einer Lenkreaktion zu 50% (3 von 6 Vpn) eine bewusste Wahrnehmung des haptischen Signals vorausgeht. Zudem kann beobachtet werden, dass die Vpn, sofern sie das haptische Signal bewusst wahrnehmen, auf dieses zu 60% mit einer Lenkreaktion reagieren (3 von 5 Vpn). Diese Häufigkeiten sind zwar zu gering, um daraus valide Aussagen zur Fahrerreaktion auf eine bewusst wahrgenommene haptische Ausweichempfehlung in Form

¹⁰In der vorliegenden Arbeit wird dann von einer „bewussten“ Wahrnehmung ausgegangen, wenn sich die Vpn in der Nachbefragung an die haptische Warnung erinnern können.

einer einseitigen Lenkradvibration oder eines Lenkradrüttelns mit Richtungsmoment abzuleiten, dennoch sind sie zunächst positiv zu werten. Es kann vermutet werden, dass eine bewusst wahrgenommene haptische Anregung der untersuchten Form in einer Kollisionssituation die Tendenz zu einer Ausweichreaktion erhöhen kann.

Alternativ kann angenommen werden, dass die haptische Signalisierung *nie* bewusst wahrgenommen werden konnte. Demnach würden die Vpn, die mit einer Ausweichreaktion reagierten, diese im Nachhinein in einer vorherigen haptischen Aufforderung am Lenkrad begründet sehen. Das plötzliche Abbremsen des Vorderfahrzeugs stellt eine komplexe Fahrsituation dar, die höchstwahrscheinlich mit einer Schreckreaktion des Fahrers einhergeht ([Bar04a]). Es gilt als äußerst schwierig, konkrete Einzelheiten der Situation im Nachhinein zu rekapitulieren, so dass denkbar ist, dass die Vpn ihre erinnerten Handlungen als Reaktionen auf bestimmte Ereignisse - bspw. das (Nicht)Wahrnehmen einer haptischen Warnung – interpretieren. Unabhängig davon, ob in den wenigen berichteten Fällen einer bewussten Wahrnehmung tatsächlich ein bewusstes Wahrnehmen vorlag, stellt sich die Frage, warum die haptischen Signale derart häufig *nicht* bewusst wahrgenommen werden.

Zunächst stellt die Tatsache, dass die einseitige Lenkradvibration (wie auch das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment) in der Ausweichsituation fast nie bewusst wahrgenommen wird, keinen Widerspruch zur durchgehend bewussten Wahrnehmung des Signals in den Studien SRC und LDW dar. In den letztgenannten Studien wird eine endogene Ausrichtung der Aufmerksamkeit instruiert, d. h. die Vpn richten Ihre Aufmerksamkeit bewusst auf die Stimuli am Lenkrad. Im Gegensatz dazu soll der Ausweichstimulus exogen eine Ausrichtung der Aufmerksamkeit auf das Lenkrad bewirken (vgl. [LBHM99]). Diese Unterscheidung zwischen endogener und exogener Aufmerksamkeitsausrichtung kann als Erklärung der nicht bewussten Wahrnehmung herangezogen werden.

Die grundlegenden Theorien zur Aufmerksamkeit werden von Oakley & Park resümiert ([OP08]). Demnach wurde die Aufmerksamkeit des Menschen lange Zeit als Prozess angesehen, für den lediglich limitierte Res-

sources bereitstehen ([Kah73]), was dazu führt, dass die Aufmerksamkeit gezielt auf Einzelereignisse fokussiert werden muss, wodurch anderen Ereignissen eine geringere oder gar keine Aufmerksamkeit zugeteilt werden kann. Bei multimodalen Ereignissen gehen dem Multiple-Ressource-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung zufolge die gleichzeitige Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen verschiedener Sinnesmodalitäten mit weniger Interferenzen einher ([WL88], [KM97]). Während derartige Effekte bislang hauptsächlich beim Zusammenspiel der auditiven und der visuellen Modalität nachgewiesen werden konnten, befindet sich die Forschung bzgl. der Einbeziehung der haptischen Modalität gemäß [OP08] noch in ihren Kinderschuhen.

Während in [CMM05] sowie [TML⁺05] davon berichtet wird, dass die vibrotaktile Perzeption nicht unter der gleichzeitigen Bewältigung einer Nebenaufgabe leidet, konnten Oakley & Park genau dies feststellen. Sie untersuchen drei Vibrationsstimuli verschiedener Rauigkeit an drei verschiedenen Körperstellen unter drei verschiedenen Nebenaufgaben, mit denen mentale und körperliche Belastungen nachgestellt wurden. Als Ergebnis verschlechterte sich die Rate der bewusst wahrgenommenen Vibrationsstimuli durch die Nebenaufgaben um bis zu 20%.

Diese Maskierung der vibrotaktilen Wahrnehmung kann zur Erklärung der geringen Anzahl bewusst wahrgenommener Stimuli teilweise herangezogen werden. Darüber hinaus wird erneut auf das in Abschnitt 6.1.2 angeführte Prinzip der psychologischen Refraktärperiode (PRP) hingewiesen, die das Zeitintervall beschreibt, in welchem lediglich eine serielle Reizverarbeitung möglich ist. Es wird angenommen, dass bei gleichzeitiger Beanspruchung unterschiedlicher Modalitäten lediglich bei einer Modalität eine bewusste Reizwahrnehmung erfolgt. In der Kollisionssituation wird die visuelle Modalität durch das Aufleuchten der Bremslichter und das Näherkommen des Vorderfahrzeugs gleichermaßen stimuliert wie die haptische Modalität. Obwohl in der SRC-Studie kein negativer Einfluss der simultanen visuellen und haptischen Reizung auf die Reaktionsleistung der Vpn beobachtet werden konnte (vgl. Abschnitt 6.2.5), können derartige durch die PRP bedingte Leistungsreduktionen nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Es stellt sich weiter die Frage, warum die Vpn in Gruppe B eher von einer bewussten Wahrnehmung der haptischen Anregung berichten, als die Vpn in den Gruppen C und D. Eine mögliche Erklärung kann im Gewöhnungseffekt gefunden werden. Während die einseitige Lenkradvibration in Gruppe B ein neuartiges Warnsignal darstellt, welches die Vpn zum ersten Mal erleben, waren die Vpn in den Gruppen C und D im Schnitt bereits 37 Mal in Kontakt mit dem Warnsignal. Aus der sportmedizinischen Therapie ist bekannt, dass sich bei Vibrationsreizung ein Habituationseffekt einstellen kann, der mit einer geringeren Erregbarkeit der Nervenzellen einhergeht ([HTKS04]). Es ist denkbar, dass sich durch die mehrfache Reizung ein Gewöhnungseffekt einstellt, der eine bewusste Wahrnehmung erschwert.

Bleibt die Frage nach der Auswirkung der haptischen Lenkradsignale auf die Bremsreaktion. Es kann festgestellt werden, dass die haptische Stimulation in den seltensten Fällen mit einer bewussten Wahrnehmung einhergeht. Damit findet durch den Fahrer zunächst auch keine bewusste Verknüpfung von Reiz- und Handlungsort statt. Dennoch erfolgt eine unbewusste Wahrnehmung, die sich in der Leistungsverbesserung in der Bremsreaktion manifestiert. Es kann nun gefolgert werden, dass das Signal unbewusst auf eine Änderung eines Normalzustandes hinweist und eine Erhöhung der Aufmerksamkeit des Fahrers zur Folge hat, die in der natürlichen (weil in jedem Fall kritikalitätsmindernden) Reaktion „Bremsen“ resultiert. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass die durch die Signale gelernte Assoziationsvermittlung zu einer drohenden Spurverlassenssituation insbesondere in den Gruppen C und D auch unbewusst wirkt, was hier zwar nicht zu einer Lenkreaktion führt, aber aus zwei Gründen negative Auswirkungen auf die Reaktionszeit hat. Zum einen offenbart der Blick auf die Straße eine Divergenz der realen und der assoziierten Situation, zu deren Auflösung zusätzliche kognitive Ressourcen benötigt werden. Zum anderen erfordert die gelernte Spurverlassenssituation keine vergleichbar schnelle Reaktion wie die Kollisionssituation. Beides kann als Erklärung dafür dienen, warum die Vpn in Gruppe B schneller Bremsen als die Vpn in den Gruppen C und D.

Unabhängig von der Erwartungshaltung vor Versuchsbeginn und von möglichen Erklärungen für das Nichteintreten dieser Erwartungen, wird folgende Feststellung gemacht: in der vorliegenden Studie konnten haptische Signale in der *Lenkung* erfolgreich zur Beeinflussung von Fahrerreaktionen bzgl. der Fahrzeug*längs*führung eingesetzt werden. Ein derartiger Nachweis wurde in der Literatur bislang vermisst (vgl. Abschnitt 2.4). Ohne bewusst von den Vpn wahrgenommen zu werden, führten die haptischen Signale dazu, dass die Vpn schneller bremsen und vor der Kollision mehr Geschwindigkeit abbauen konnten. Derartige unbewusst erfolgenden Reaktionen auf haptische Warnungen eröffnen neue Möglichkeiten in der Fahrzeug-Fahrer-Interaktion.

8.4. Empfehlungen für haptische Ausweichhinweise

Entgegen der Hypothese bewirkte weder die einseitige Lenkradvibration noch das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment eine Ausweichreaktion der Vpn in einer drohenden Kollisionssituation. Dies kann in der untersuchten Situation begründet sein, die hohe Ansprüche an die Reaktionsleistung der Vpn stellt. So ist durchaus denkbar, dass in einer anderen Kollisionssituation ein positiver Effekt der beiden Warnsignale beobachtet hätte werden können. Ein derartiges Vorgehen der gezielten Anpassung der Kollisionssituation zur Erzielung eines positiven Untersuchungsergebnisses scheint jedoch wenig zielführend.

Vielmehr werden die ausbleibenden Ausweichreaktionen dem Signalcharakter zugeschrieben. Bei beiden haptischen Signalen handelt es sich um Warnsignale, die für die Funktion Spurverlassenswarnung dimensioniert wurden, und deren erfolgreicher Einsatz in dieser Anwendung im Vergleich zu alternativen Signalen nachgewiesen werden konnte. Die Ergebnisse der LDW-Studie legen den Schluss nahe, dass ein dezenter Signalcharakter für die Anwendung in LDWS nicht nur förderlich sondern vielmehr ausschlaggebend für die Präferenz der Fahrer sein kann, sofern die Grundanforderungen – Vibrations- bzw. Rüttelsignal mit Richtungsinformation – erfüllt werden. Es wird hypothetisiert, dass sich durch

eine Steigerung der Intensität der untersuchten haptischen Signale eine Wirkung in der Kollisionssituation eingestellt hätte. In der vorliegenden Form sind beide Signale jedoch nicht als Kollisionswarnsignale zu empfehlen.

Dennoch muss insbesondere auf Basis theoretischer Überlegungen und aufgrund positiver Erkenntnisse in der Literatur (insbesondere [KS09]) die haptische Übermittlung eines Ausweichhinweises in der Lenkung empfohlen werden. Die mechanische Anregung am Lenkrad scheint trotz der in diesem Kapitel beschriebenen Erkenntnisse prädestiniert zur Initiierung einer Fahrerreaktion bzgl. der Fahrzeugquerführung. Hierbei überwiegen insbesondere die Interpretationsvorteile, die sich durch die Übereinstimmung von Reiz- und Handlungsort bei bewusster Wahrnehmung des Warnsignals ergeben. Die einzig echte Alternative zu haptischen Ausweichhinweisen in der Lenkung scheinen derzeit komplexe visuelle Anzeigen zu sein, die den Ausweichpfad mithilfe eines kontaktanalogen Head-Up-Displays direkt auf die Straße projizieren ([WHU⁺10]). Eine weitere Favorisierung haptischer Signalisierungen in der Lenkung ist deshalb in der deutlich kostengünstigeren Realisierung zu sehen.

Zusammenfassung der Hypothesen und Ergebnisse

- H.FCW:** Die einseitige Lenkradvibration kann in einer drohenden Kollisionssituation eine Ausweichreaktion hervorrufen.
- .1a:** Bei der drohenden Frontalkollision reagieren Fahrer eher mit einer Brems- als mit einer Lenkreaktion, auch wenn nur durch letztere die Kollision vollständig vermieden werden kann.
- .1b:** Reagieren Fahrer mit einer Lenkreaktion und ist die Ausweichrichtung beliebig, dann weichen Fahrer eher nach links als nach rechts aus.
- .1c:** Fahrer, die in der Kollisionssituation durch ein haptisches Signal in der Lenkung gewarnt werden, reagieren häufiger mit einer Ausweichreaktion als Fahrer, die nicht gewarnt werden.

- .1d:** Fahrer, die vorab die Reiz-Reaktions-Zuordnung durch den Einsatz des haptischen Signals in der Lenkung als Spurverlassenswarnsignal erlebt haben, reagieren in der Kollisionssituation bei haptischer Warnung mit dem gleichen Signal häufiger mit einer Lenkreaktion als Fahrer, die das haptische Warnsignal zum ersten Mal erleben.
- .1e:** Die Reaktionen unterscheidet sich bei den beiden untersuchten Kollisionswarnsignalen nicht.
- .2:** Die Spurverlassenswarnung hat einen objektiven Nutzen in der Spurverlassenssituation.

Die Haupthypothese H.FCW wird verworfen. Die einseitige Lenkradvibration hat keinen messbaren Einfluss auf die Handlungsentscheidung der Vpn.

Hypothese H.FCW.1a wird bestätigt. In der Kollisionssituation reagieren die ungewarten Fahrer zumeist mit einer reinen Bremsreaktion, wodurch die Kollision nicht vollständig verhindert werden kann. H.FCW.1b kann aufgrund der geringen Anzahl an Lenkreaktionen nicht überprüft werden. Die Hypothesen H.FCW.1c und d müssen verworfen werden. Die haptische Signalisierung am Lenkrad führt in der untersuchten Kollisionssituation nicht zu einer Erhöhung der Anzahl der Ausweichreaktionen, und das unabhängig davon, ob die Reiz-Reaktions-Zuordnung vorab durch den Einsatz des Signals als Spurverlassenswarnsignal erlernt werden konnte oder nicht. H.FCW.1e wird zwar nicht abgelehnt, kann aufgrund der ausbleibenden Wirkung der haptischen Warnung aber als hinfällig angesehen werden.

Hypothese H.FCW.2 wird nicht abgelehnt, da sich ein positiver Effekt der Spurverlassenswarnung durch eine Reduktion der mittleren Spurverlassensdauer einstellt.

9. Zusammenfassung und Ausblick

9.1. Kernergebnisse der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurden synthetische haptische Signale in der Lenkung betrachtet, denen a-priori ein Potential zur Beeinflussung von Fahrerreaktionen bzgl. der Fahrzeugquerführung zugesprochen wurde. Die Analyse des Standes der Technik konnte die primäre Anwendung derartiger Signale bei der Warnung in der drohenden Spurverlassenssituation identifizieren. Der weniger wissenschaftlichen Formulierung „haptische Warnung ist nicht gleich haptische Warnung“ wurde nicht erst in dieser Arbeit empirisch nachgegangen. Es muss dennoch festgestellt werden, dass die auf einer höheren Detailebene vorgenommene Unterscheidung zwischen „Lenkmomenten“ und „Lenkradvibrationen“ noch zu wenig differenzierend ist. Basis der vorliegenden Arbeit ist daher die Kategorisierung in „propriozeptive“ und „taktile“ Signale, die physiologisch basierte Unterschiede in der Signalwahrnehmung, und damit den „Faktor Mensch“ berücksichtigt, und im Rahmen dieser Arbeit auch zur Unterscheidung der Art der Signalerzeugung herangezogen wird.

Insbesondere bei der Betrachtung von Vibrationen wird die Notwendigkeit der vorgenommenen Kategorisierung offensichtlich, die eine begriffliche Differenzierung unumgänglich macht. So wird über alternierende Lenkmomente ein „Lenkradrütteln“ erzeugt, welches sich hinsichtlich Stärke, Frequenz und insbesondere Richtung von der taktilen „Lenkradvibration“ unterscheidet, zu deren Erzeugung zweckmäßig Unwuchtmotoren eingesetzt werden. Es wird festgestellt, dass die bestehende Literatur insbesondere erstgenannte Anregungen untersucht, so dass Resultate publizierter Forschungsarbeiten primär als Basis der Hypothesenbildung für die vorliegende Arbeit dienen, und ein Handlungsbedarf auf dem

Gebiet der taktilen Lenkradvibrationen identifiziert werden kann. Hier wurden Einflüsse von Parametervariationen auf die empfundene Intensität und Interpretation von Vibrationsbotschaften explorativ evaluiert, wobei bereits allgemein bekannte Erkenntnisse durch neue Befunde zum Einfluss der Vibrationsdauer erweitert werden konnten.

Insbesondere die Möglichkeit der Applikation orts aufgelöster Lenkradvibrationen durch räumlich verteilte Unwuchtmotoren wird als vorteilhafte Eigenschaft der taktilen Signalisierung erachtet, da hierdurch die Kommunikation von Richtungsinformation an den Fahrer ermöglicht wird. Auf Basis des Standes der Technik wird die subjektive Präferenz vibrationsbasierter Spurverlassenswarnungen mit signalinhärenter Richtungsinformation hypothetisiert. Es wird davon ausgegangen, dass die einseitige vibrotaktile Reizung am Lenkrad die semantische Bedeutung des Spurabkommens übermittelt, so dass Interpretations- und damit Reaktionsvorteile zu erwarten sind. In der Anwendung als Spurverlassenswarnsignal macht dies eine kontralaterale Reiz-Reaktions-Zuordnung notwendig, die im Rahmen dieser Arbeit empirisch legitimiert werden konnte. Während ein ipsilaterales Lenken in Richtung der Vibration in einer abstrakten Umgebung logischer ist und damit zu schnelleren und fehlerfreieren Reaktionen führt, konnten tendenzielle Leistungsvorteile des kontralateralen Mappings im Fahrkontext beobachtet werden.

Im direkten Vergleich mit weiteren für die Funktion LDW optimierten haptischen Signalen in der Lenkung konnte die hypothetisierte subjektive Präferenz der einseitigen Lenkradvibration statistisch belegt werden. Wie auch bei den weiter präferierten Signalen konnte die „Verständlichkeit“ des Warnsignals als wesentlicher Einflussfaktor identifiziert werden, wonach mithilfe des direktionalen Vibrierens bzw. Rüttelns sowohl der Grund der Warnung als auch die Handlungsempfehlung verständlich kommuniziert wird. Als alleiniges Merkmal unter den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Signalen bedarf die einseitige Lenkradvibration keiner Lenkmomentenanregung zur Übermittlung der Richtungsinformation. Ein richtungsgebendes Lenkmoment führte im direkten Vergleich zu einer signifikant geringeren Toleranz der V_{pn} gegenüber subjektiv als unnötig empfundenen Warnsignalauslösungen.

Im Anschluss wurden mit der einseitigen Lenkradvibration und dem Lenkradrütteln mit Richtungsmoment zwei Signale eingehender untersucht, die beide die Anforderung der Kombination eines Vibrations- oder Rüttelanteils mit einer Richtungsinformation erfüllen. Soweit durch das notwendige methodische Vorgehen der Arbeit möglich, konnte neben der subjektiven Präferenz ein objektiver Nutzen beider Signale in der Spurverlassenssituation beobachtet werden. Weiter konnte festgestellt werden, dass die einseitige Lenkradvibration bei unberechtigter Applikation keine messbaren Auswirkungen auf die Fahrzeuglängsführung ausübt und auch die messbaren Auswirkungen auf die Querführung keine bedeutsame Änderung der Fahrzeugposition zur Folge haben. Auf Basis dieser Erkenntnisse kann eine starke Empfehlung für den Einsatz einseitiger Lenkradvibrationen als Warngabe von Spurverlassenswarnsystemen ausgesprochen werden.

In der Spurverlassenssituation werden durch die haptischen Signale Fahrerreaktionen am Lenkrad initiiert. Hierauf basierend wird die Hypothese formuliert, dass dem Aufforderungscharakter der Signale auch in spurverlassensfremden Anwendungen nachgekommen wird, und mit den Signalen bspw. auch Ausweichreaktionen in einer drohenden Frontalkollisionssituation initiiert werden können. Diese Hypothese wurde sowohl für die einseitige Lenkradvibration als auch für das Lenkradrütteln mit Richtungsmoment in der Fahrsimulation überprüft, und konnte nicht bestätigt werden. Die haptische Warnung in der Lenkung, die erwartungsgemäß zu einem höheren Anteil an Lenkreaktionen führen hätte sollen, wurde von den Vpn selten bewusst wahrgenommen und hatte keine messbare Auswirkung auf die Handlungsentscheidung.

Gleichwohl konnte ein Einfluss der haptischen Signalisierung am Lenkrad auf die Handlungs*ausführung* festgestellt werden. So konnten durch die haptische Warnung deutliche Bremsreaktionszeitverkürzungen beobachtet werden, die teilweise statistisch nachgewiesen werden konnten. Dem Kenntnisstand des Autors zu Folge, konnten Wirkungen haptischer Signalisierungen in der Lenkung auf die Fahrzeuglängsführung bislang nicht nachgewiesen werden. Der in der vorliegenden Arbeit erbrachte Nachweis widerspricht der ursprünglichen Erwartungshaltung, wonach

mechanische Anregungen in der Lenkung zweckmäßig *nur* zur Beeinflussung der Fahrzeugquerführung eingesetzt werden sollten, und jegliche davon abweichende Umsetzung für Fahrer nur schwer interpretierbar ist und zu einer Beeinträchtigung der Reaktionsleistung führt.

9.2. Zur Praxistauglichkeit der einseitigen Lenkradvibration

Die Praxistauglichkeit der einseitigen Lenkradvibration wird durch technische und betriebswirtschaftliche Rahmenbedingungen ebenso beeinflusst wie durch den „Faktor Mensch“. So stellt sich zunächst die Frage, ob einseitige Lenkradvibrationen mit vertretbarem Kostenaufwand zu realisieren sind. Die naheliegende Umsetzung sieht den Einsatz von mindestens zwei Vibrationsaktoren vor, wobei eine eindeutige Lokalisierbarkeit des Vibrationsortes bei minimaler Übertragung mechanischer Energie auf die passive Seite durch konstruktive Maßnahmen sicherzustellen ist. Der im Rahmen dieser Arbeit entstandene Lenkradaufbau erfüllt diese Forderung der Lokalisierbarkeit. Der prototypische Charakter der Umsetzung, der eine Klebeverbindung zur Wiederanbringung der mit Vibrationsmotoren bestückten Lenkradsegmente verwendet, legitimiert sich aus den Anforderungen an die Forschungsarbeit, kann aber insbesondere aus Aspekten der Robustheit gegenüber Fahrergriffkräften Dauereinsatz nicht zur Anwendung kommen.

Die Realisierung eines Serienaufbaus ist nicht Gegenstand dieser Arbeit und wird als zukünftiges Entwicklungsfeld identifiziert. Sofern eine geeignete Umsetzung, bspw. mit zwei Vibrationsmotoren, unter Einhaltung der Forderung nach mechanischer Entkopplung der durch die Aktoren angeregten Lenkradsegmente vorgenommen werden kann, ist zu prüfen, ob der nachgewiesene Kundennutzen die evtl. entstehenden Mehrkosten rechtfertigt. Die einseitige Lenkradvibration ist die deutlich präferierte Warnausgabe eines Spurverlassenswarnsystems, so dass für dieses Signal eine hohe Nutzerakzeptanz, verbunden mit einer hohen

Kaufbereitschaft, abgeleitet werden kann. Gleichwohl erscheint die Realisierung einer umlaufenden Lenkervibration, für deren Applikation ein Vielfaches an Vibrationsaktoren benötigt wird, auf Grund der im Rahmen der Arbeit gewonnenen Erfahrungen, insbesondere bzgl. der Herausforderungen an die mechanische Entkopplung, nur schwer möglich. Sollte ein derartiges Interaktionskonzept aus dem Nutzerbedarf abgeleitet werden, so sind alternative Realisierungen, bspw. unter Verwendung von Piezoaktoren, anzudenken, die dann aufgrund der neuen Empfindungsqualität erneute Grundlagenuntersuchungen notwendig machen.

Die Forderung nach eindeutiger Lokalisierbarkeit der einseitigen Vibrationsanregung soll im weiteren Verlauf zur Diskussion gestellt werden. Bei dem prototypischen Aufbau der vorliegenden Arbeit konnte eine leichte Vibrationsübertragung von der aktiven auf die passive Seite festgestellt werden. In der konkreten Anwendung stellt sich diese Eigenschaft nicht als nachteilig heraus. Demnach ist zu fordern, dass eine Anregung unabhängig von der Lenkervhaltung wahrgenommen werden kann. Mit anderen Worten sollten die Fahrer in der Lage sein, jederzeit eine Lenkervibration zu spüren, und die Richtungsinformation der einseitigen Anregung nur bei „richtiger“ beidseitiger Haltung, idealerweise in der „Viertel-vor-Drei“-Position, aus dem Signal zu extrahieren.

Bezüglich des „Faktors Mensch“ muss eine Auseinandersetzung insbesondere mit der Frage stattfinden, ob die Annahme einer beidhändigen Lenkervhaltung in der realen Anwendung aufrecht zu erhalten ist. Aus dem Stand der Technik (s. Abschnitt 3.3.3) sind hierzu nur wenige Studien bekannt, die keine abschließende Aussage zu tatsächlichen Lenkervhaltungen von Fahrern ermöglichen. Zunächst muss festgestellt werden, dass die zur Wahrnehmung der Richtungsinformation geforderte beidhändige symmetrische Lenkervhaltung nicht unnatürlich ist. Eine Reanalyse von Versuchsdaten eines Fahrsimulatorversuchs zum Fahrerverhalten bei Seitenwind, bei dem keine explizite Instruktion zur Lenkervhaltung gegeben wurde, ergab einen Anteil von 87% mit beidhändiger Lenkervhaltung. Diese Ergebnisse sind zwar auch der speziellen Untersuchungssituation im Fahrsimulator geschuldet und damit nicht auf das Fahren im realen Straßenverkehr zu übertragen, sie zeigen je-

doch, dass eine beidhändige symmetrische Lenkradhaltung auch über einen längeren Zeitraum ohne Weiteres eingenommen werden kann.

Weiterhin muss festgestellt werden, dass das der Auslösung der Spurverlassenswarnung vorausgehende drohende Spurabkommen auch und insbesondere bei unaufmerksamen oder müden Fahrern zu erwarten ist. Ein häufiger Grund für Unaufmerksamkeit ist eine Ablenkung des Fahrers, wenn dieser bspw. Eingaben in einem Navigations- oder Audiosystem vornimmt. Sofern diese Interaktion über die Tasten eines Multifunktionslenkrades erfolgt, bei denen eine zunehmende Marktdurchdringung beobachtet werden kann (vgl. Abschnitt 2.4), kann von einer beidhändigen symmetrischen Lenkradhaltung ausgegangen werden. Zudem gibt es Hinweise darauf, dass Fahrer zur Kompensation eines erhöhten Unfallrisikos (z. B. bei aufkommender Müdigkeit) bewusst eine sichere beidhändige Lenkradhaltung einnehmen ([WT05]).

9.3. Ausblick

Die vorliegende Arbeit konnte insbesondere die kontralaterale Anwendung der einseitigen Lenkradvibration legitimieren und deren subjektive Präferenz als Spurverlassenswarnsignal nachweisen. Theoretische Überlegungen und insbesondere auch Teilergebnisse der FCW-Studie legen weiterhin die starke Vermutung nahe, dass der Nutzen der einseitigen Lenkradvibration in der Spurverlassenssituation auch objektiv messbar ist, so dass deren Einsatz für die Funktion LDW aus Sicht des Autors als nachgewiesen gilt. Sofern dennoch eine abschließende Bewertung des tatsächlichen objektiven Nutzens als notwendig erachtet wird, könnte in einer weiteren Untersuchung Spurverlassen bspw. durch induzierte Schläfrigkeit valide provoziert, und Reaktionen von naiven Fahrern beim Erstkontakt mit dem Signal ausgewertet werden. Ein derartiger Versuch ist allerdings mit einem hohen Aufwand verbunden, welcher eher bei einer seriennahen Umsetzung und weniger in einem frühen prototypischen Stadium zu rechtfertigen ist.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Beschränkung auf Signalisierungen auf Basis von Systementscheidungen vorgenommen. Wenngleich die Provokation einer Ausweichreaktion in einer drohenden Frontalkollision nach Meinung des Autors sinnvoll durch eine haptische Signalisierung am Lenkrad erfolgen sollte, wird hierfür die einseitige Lenkradvibration in der vorliegenden Form nicht als geeignet erachtet. Für diese Funktion sind alternative Signalformen zu erarbeiten, wobei ein deutlicher Vibrations- oder Rüttelanteil zur Erhöhung der Wahrnehmbarkeit des Signals angedacht werden kann. Ob eine einseitige Lenkradvibration neben der Anwendung in der Funktion LDW auch als Warngabe bei einem gefährlichen Spurwechsel eingesetzt werden kann, muss in weiteren Untersuchungen evaluiert werden, gilt zunächst jedoch als fraglich. Die Identifikation möglicher Anwendungen systeminitiiertener Signalisierungen mit Hilfe einseitiger Lenkradvibrationen ist mit der Funktion Spurverlassenswarnung aus Sicht des Autors nach derzeitigem Kenntnisstand mit der vorliegenden Arbeit abgeschlossen. Inwiefern sich Anwendungen der einseitigen Lenkradvibration als explizit angeforderte Signale ergeben, ist zu untersuchen.

Weitere Schritte sollten wie in Abschnitt 9.2 beschrieben auf eine robuste und kostengünstige Realisierung der einseitigen Lenkradvibration fokussieren. Weiterhin wurden bezüglich der Lenkradhaltung in der vorliegenden Arbeit Lücken im Stand des Wissens identifiziert. So muss festgestellt werden, dass über die Interaktion des Fahrers mit dem Lenkrad nur wenige gesicherte Erkenntnisse vorliegen. Die Erhebung derartiger Informationen, die für über die vorliegende Arbeit hinausgehende Fragestellungen relevant sein sollten, wird aus diesem Grunde empfohlen. Als methodische Vorgehensweise scheinen hierzu insbesondere sog. „Naturalistic Driving Studies“ geeignet zu sein, in denen Fahrzeuge in Langzeitversuchen mit entsprechender Messtechnik zur Datenaufzeichnung versehen werden.

Die Möglichkeit der Applikation örtlich begrenzter Lenkradvibrationen zur Übermittlung von Richtungsinformation wurde als ein Vorteil der taktilen Vibrationserzeugung ausgemacht und mit der einseitigen Lenkradvibration detailliert untersucht. Darüber hinaus wurde ein Mangel

an Untersuchungen zu ungerichteten taktilen Lenkradvibrationen und eine starke Fokussierung der bestehenden Literatur auf propriozeptives Lenkradrütteln festgestellt. Die Empfindungen, die durch Parametervariationen taktiler Lenkradvibrationen hervorgerufen werden können, reichen von leichtem „Kitzeln“ bis hin zu stärkerem „Rumpeln“. Damit können Lenkradvibrationen z. B. derart gestaltet werden, dass diese deutlich wahrnehmbar aber dennoch ignorierbar sind. Der Einsatz derartiger Lenkradvibrationen wird in Forschungstätigkeiten der Robert Bosch GmbH aktuell geprüft.

Die Empfindung von Lenkradvibrationen wird maßgeblich durch deren Frequenz und Amplitude beeinflusst. Weiterhin konnte ein deutlicher Einfluss der Vibrationsdauer im Rahmen dieser Arbeit festgestellt und in Folgestudien spezifischer untersucht werden. Denkbar ist weiterhin, temporale Darbietungsmuster zur Übermittlung dynamischer Information über Lenkradvibrationen einzusetzen. Hier kann ein Bedarf an weiteren Untersuchungen festgestellt werden.

Zuguterletzt ergibt sich ein zukünftiger Forschungsbedarf aus der Beobachtung, dass die haptische Signalisierung in der Ausweichsituation zu einer Reduktion der Bremsreaktionszeit führen kann. Inwiefern sich hierdurch neue Möglichkeiten der Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrer ergeben, bleibt abzuwarten.

A. Literaturübersichten

A.1. Studien zu haptischen Spurverlassenswarnsignalen in der Lenkung

Tab. A.1 und A.2 fassen den Stand der Technik zu haptischen Spurverlassenswarnsignalen in der Lenkung zusammen. In Tab. A.1 werden die Studien zu haptischen Spurverlassenswarnsignalen mit Angabe von Studienart und Stichprobengröße aufgelistet. Tab. A.2 klassifiziert diese Studien nach den verwendeten Signalarten (gerichtetes Lenkmoment, Lenkradrütteln sowie Lenkradrütteln mit Richtungsinformation), und listet die Signalbezeichnungen sowie die verwendeten Parameter auf.

A.2. Psychophysische Wahrnehmungskurven von Lenkradvibrationen

Tab. A.3 fasst Untersuchungen zu psychophysischen Wahrnehmungskurven von Lenkradvibrationen zusammen, und unterteilt diese in die Untersuchungsgegenstände Reizschwelle, Equal Sensation Curve (ESC), Equal Annoyance Curve (EAC), sowie (Dis-)Komfort- und Toleranzschwellen.

Tab. A.1.: Studien zu hapt. Spurverlassenswarnsignalen in der Lenkung:
Studienart & Stichprobengröße

Quelle	Studienart	Stichprobe
[ABD96]	Realfahrzeug	$n = 12$
[Kop94]	Teststrecke	$n = 12$
[KPB ⁺ 06]	Fahrsimulator	$n = 32$
[MP04]	Fahrsimulator	$n = 26$
[MP04]	Realfahrzeug	$n = 16$
[Mar01]	Fahrsimulator	k. A.
[MMM06]	Fahrsimulator	k. A.
[MOWI00]	Realfahrzeug	$n = 7$
[NMH ⁺ 06], [NMH07]	Fahrsimulator	$n = 20$
[NMH07], [NMF ⁺ 08], [EJFN ⁺ 08]	Fahrsimulator	$n = 20$
[PE03]	Teststrecke	$n = 28$
[Rot95]	Fahrsimulator	$n = 18$
[SGK ⁺ 98], [SKA00]	Fahrsimulator	$n = 10$
[SGK ⁺ 98], [SKA00]	Realfahrzeug	$n = 3$
[SJ03]	Fahrsimulator	$n = 24$
[TJP ⁺ 96]	Fahrsimulator	$n = 64$
[ZFRK95], [BCLM98]	Fahrsimulator	$n = 18$

Tab. A.2.: Studien zu hapt. Spurverlassenswarnsignalen in der Lenkung: Signalbezeichnungen & -parameter (nur erste Quelle angegeben, weitere Quellen (Kennzeichnung mit *) s. Tab.A.1.)

Quelle	Bezeichnung	Parameter
Warnsignal „Gerichtetes Lenkmoment“		
[ABD96]	steady torque	einstellbar: 2 – 5 Nm; 1 – 5 s
[KPB ⁺ 06]	steering wheel torque	k. A.
[MP04]	Lenkmoment	1, 5 Nm; 1 s
[MP04]	Lenkmoment	1, 5 Nm; 1 s
[Mar01]	randaktive Zusatzkräfte	k. A.
[MMM06]	active torque	einstellbar (<3 Nm; 4 s)
[PE03]	torque	einstellbar (z. B. 0, 5 Nm; 1 s)
[SGK ⁺ 98]*	torque	2 Pulse à 50 ms, 200 ms Pause
[SGK ⁺ 98]*	torque	2 Pulse à 50 ms, 200 ms Pause
[TJP ⁺ 96]	torque	2 Nm; 1, 5 s
[ZFRK95]*	torque	k. A.
Warnsignal „Lenkdrütteln“		
[ABD96]	Vibration	±1, 5 Nm; 12 Hz
[MP04]	Lenkdrütteln	k. A.
[NMH ⁺ 06]*	vibratory warning	±4° (kein Fahrerkontakt); 5 Hz
[Rot95]	Lenkdrütteln	±4 Nm; 20 Hz
[SJ03]	steering vibration	±1, 5 Nm; 5 Hz
[TJP ⁺ 96]	vibrated steering wheel	±1, 5 Nm; 10 Hz für 1 s
[ZFRK95]*	oscillating steering wheel	k. A.
Warnsignal „Lenkdrütteln mit Richtungsmoment“		
[Kop94]	Moment + Vibration	±4 Nm; 15 Hz; 1, 5 Nm Offset
[KPB ⁺ 06]	vibration + torque	±4 Nm; 15 Hz; Offset: k. A.
[MOWI00]	vibration + torque	< ±1, 2 Nm; 1, 5 s; Offset: k. A.
[NMH ⁺ 06]*	motor priming	±4, 6°; 3, 3 Hz; 1, 4° Offset
[NMH07]*	motor priming	±1, 25 Nm; 3, 3 Hz; 0, 75 Nm O.
[Rot95]	Lenkdrütteln + Moment	±0, 4 Nm; 20 Hz; 0, 5 Nm Offset
[SJ03]	pulse-like steering torque	±1 Nm; 3 Hz; 1 Nm Offset


Tab. A.3.: Studien zu psychophysischen Wahrnehmungskurven von Lenk-
radvibrationen (RS = Reizschwelle, ESC = Equal Sensation Curve, EAC =
Equal Annoiance Curve, DS = Diskomfortschwelle)

Quelle	Kurve	Vpn	f [Hz]	Inhalt
[Mor03b]	RS	$n = 12$	4 – 250	Vibration gerade wahrnehmbar 2 Lenkradhaltungen
[GO99]	ESC	$n = 25$	8 – 22, 4	Relativvergleich mit Referenz: 16 Hz, 1,86 m/s ² (r.m.s.), 16 Hz, 5,58 m/s ² (r.m.s.)
[GO99]	ESC	$n = 25$	31,5 – 125	Relativvergleich mit Referenz: 63 Hz, 1,86 m/s ² (r.m.s.), 63 Hz, 5,58 m/s ² (r.m.s.)
[SGDR01]	ESC	$n = 30$	5 – 315	Relativvergleich mit Referenz: 49 Hz, 0,5 m/s ² (r.m.s.), 10 Hz, 0,2 m/s ² (r.m.s.), 10 Hz, 0,4 m/s ² (r.m.s.)
[GSDR04]	ESC	$n = 15$	3 – 315	Relativvergleich mit Referenz: 63 Hz, 1 m/s ² (r.m.s.), 63 Hz, 1,5 m/s ² (r.m.s.)
[AMTG05]	EAC	$n = 28$	8 – 20	Relativvergleich mit Referenz: 14 Hz, 0,8 m/s ² (r.m.s.), 14 Hz, 1,6 m/s ² (r.m.s.); Rotationsvibrationen
[AMTG05]	EAC	$n = 28$	10 – 64	Relativvergleich mit Referenz: 25,5 Hz, 1 m/s ² (r.m.s.); Translationsvibrationen
[AG07b], [AG09a]	ESC	$n = 20$	3 – 400	Absolutbewertung (Borg CR10)
[JAG09]	ESC	$n = 40$	3 – 400	Absolutbewertung (Borg CR10)
[GA00]	DS	$n = 15$	0 – 32	Absolutbewertung (Likert-Skala)
[GSDR04]	DS	$n = 15$	5 – 315	max. 5 s tolerierbar
[SGDR01]	DS	$n = 30$	5 – 315	max. 10 s tolerierbar

B. Anhang zu „Studie SRC“

B.1. Fragebögen

Vorbefragungsbogen	S. 192 - 195
Zwischenbefragung zum affektiven Gehalt der Lenkradvibration	S. 196
Zwischenbefragung zur erlebten Anstrengung	S. 197
Zwischenbefragung zur Präsenz der Szenarien	S. 198
Nachbefragung in Gruppe OS	S. 199
Nachbefragung in Gruppe MS	S. 200

 **BOSCH**

Vorbefragungsbogen

Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Vor dem Fahrversuch haben wir ein paar Fragen zu Ihrer Person.

Bitte füllen Sie diesen Bogen nach bestem Wissen und Gewissen vollständig aus. Ihre Angaben werden anonymisiert und getrennt von Ihren persönlichen Daten ausgewertet. Das Ausfüllen des Fragebogens dauert normalerweise nicht länger als 5 Minuten.

A Allgemeines

A.1 Wie alt sind Sie?	Jahre
A.2 Sie sind:	<input type="checkbox"/> männlich <input type="checkbox"/> weiblich
A.3 Sind Sie während des Versuchs (korrigiert) normalsichtig?	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein, ich habe die Fehlsichtigkeit <input style="width: 50px;" type="text"/>

B Ihre Fahrerfahrung

Beschreiben Sie bitte Ihre Fahrerfahrung anhand folgender Fragen, indem Sie die passenden Antwortalternativen ankreuzen.

B.1 Wie lange sind Sie im Besitz einer gültigen Fahrerlaubnis für einen Pkw?			
<input type="checkbox"/> < 2 Jahre	<input type="checkbox"/> 2-5 Jahre	<input type="checkbox"/> 5-10 Jahre	<input type="checkbox"/> > 10 Jahre
B.2 Wie viele Kilometer haben Sie in den letzten 12 Monaten ungefähr am Steuer eines Pkw zurückgelegt?			
<input type="checkbox"/> < 7.000km	<input type="checkbox"/> 7.000-14.000km	<input type="checkbox"/> 14.000-21.000km	<input type="checkbox"/> > 21.000km
B.3 Wie würden Sie Ihre Fahrertüchtigkeit einschätzen?			
<input type="checkbox"/> mäßig	<input type="checkbox"/> durchschnittlich	<input type="checkbox"/> gut	<input type="checkbox"/> sehr gut

Studie **Haptische Informationsübertragung**
Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2009

1/4

Die individuelle Fahrerfahrung und -gewohnheit kann eine systematische Veränderung des Lenkverhaltens zur Folge haben und wird deshalb erhoben. Der Umgang mit Computern und damit in Zusammenhang stehenden technischen Systemen kann zum Erwerb von Expertise in der sensomotorischen [...]

Vorbefragungsbogen

**C. Ihre Fahrgewohnheiten**

Beschreiben Sie bitte mit Hilfe der folgenden Adjektivpaare Ihren persönlichen Fahrstil im Vergleich zu anderen Autofahrern. Markieren Sie dazu die Position zwischen den Wortpaaren, die Ihrem Fahrstil am besten entspricht.

Im Vergleich zu anderen Autofahrern fahre ich überwiegend ...						
C.1	schnell	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	langsam
C.2	ängstlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	mutig
C.3	offensiv	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	defensiv
C.4	vorsichtig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	risikobereit
C.5	sportlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gemütlich

D. Ihre Computererfahrung

Beschreiben Sie bitte Ihre Erfahrung mit Computern anhand folgender Fragen, indem Sie die passenden Antwortalternativen ankreuzen

D.1 Wie häufig haben Sie in den letzten 12 Monaten an Experimenten am Computer teilgenommen?			
<input type="checkbox"/> gar nicht	<input type="checkbox"/> 1-2 mal	<input type="checkbox"/> 3-5 mal	<input type="checkbox"/> mehr als 5 mal
D.2 Wie viele Stunden verbringen Sie im Durchschnitt täglich am Computer? (privat + beruflich)			
<input type="checkbox"/> 0-2 Stunden	<input type="checkbox"/> 2-4 Stunden	<input type="checkbox"/> 4-6 Stunden	<input type="checkbox"/> mehr als 6 Stunden
D.3 Wie vertraut ist Ihnen der Umgang mit der PC-Maus?			
<input type="checkbox"/> sehr ungewohnt	<input type="checkbox"/> eher ungewohnt	<input type="checkbox"/> gewohnt	<input type="checkbox"/> gehe routiniert um
D.4 Wie vertraut ist Ihnen der Umgang mit dem Joystick?			
<input type="checkbox"/> sehr ungewohnt	<input type="checkbox"/> eher ungewohnt	<input type="checkbox"/> gewohnt	<input type="checkbox"/> gehe routiniert um
D.5 Wie häufig spielen Sie Computerspiele?			
<input type="checkbox"/> nie	<input type="checkbox"/> < 1 mal im Monat	<input type="checkbox"/> 1-2 mal pro Woche	<input type="checkbox"/> täglich

Koordination sowie spezieller Handlungsstrategien beitragen ([Nac08]), was hier zu Leistungsverbesserungen führen kann. Die Expertise im Umgang mit Computern wird mit einer Subskala des „Fragebogens zur Erfassung von Strategie und Expertise in Experimenten - revidierte Fassung“ (FESE-R, nach [Nac08]) erfasst.

Vorbefragungsbogen

**E Ihre Lerngewohnheit**

Bitte beschreiben Sie Ihre Lerngewohnheit mit Hilfe der folgenden Fragen. Dabei beziehen Sie bitte die Aussagen auf Ihre eigenen aktiven Lernerfahrungen während der letzten Aus- oder Weiterbildung. Die Antwortalternativen von 1 bis 5 bedeuten inhaltlich „trifft gar nicht zu“ bzw. „trifft völlig zu“. Kreuzen Sie bitte die Zahl an.

E.1 Ich versuche, Beziehungen zu den Inhalten verwandter Fächer (bzw. Lehrveranstaltungen) herzustellen.	①	②	③	④	⑤
E.2 Zu neuen Konzepten stelle ich mir praktische Anwendungen vor.	①	②	③	④	⑤
E.3 Ich versuche, neue Begriffe oder Theorien auf mir bereits bekannte Begriffe und Theorien zu beziehen.	①	②	③	④	⑤
E.4 Ich stelle mir Sachverhalte bildlich vor.	①	②	③	④	⑤
E.5 Ich versuche in Gedanken das Gelernte mit dem zu verbinden, was ich schon darüber weiß.	①	②	③	④	⑤
E.6 Ich denke mir konkrete Beispiele zu bestimmten Lerninhalten aus.	①	②	③	④	⑤
E.7 Ich beziehe das, was ich lerne, auf meine eigenen Erfahrungen.	①	②	③	④	⑤
E.8 Ich überlege mir, ob der Lernstoff auch für mein Alltagsleben von Bedeutung ist.	①	②	③	④	⑤

Die Fähigkeit, neuartige Situationen auf Basis von Erfahrungen und vorhandenem Wissen zu definieren und zu interpretieren kann Auswirkungen auf die Reaktionsleistungen der Vpn haben. Zur Erfassung der Transferleistung beim Lernen dient eine Subskala eines Fragebogens, der ursprünglich zur Ermittlung von Lernstrategien bei berufstätigen Studierenden entwickelt wurde ([SBKB06])

Vorbefragungsbogen

**F. Ihre Händigkeit**

Bitte geben Sie Ihre Handpräferenz bei der Ausübung der folgenden Tätigkeiten an, indem Sie in die entsprechenden Spalten ein + eintragen. Bitte tragen Sie ein ++ ein, wenn Ihre Präferenz so stark ist, dass Sie nie versuchen würden, die andere Hand zu benutzen, es sei denn Sie würden dazu gezwungen werden. Wenn Sie die Tätigkeit mit beiden Händen gleichermaßen ausführen können, tragen Sie bitte jeweils ein + in beide Spalten ein.


Einige der aufgeführten Tätigkeiten erfordern den Gebrauch beider Hände. In diesen Fällen ist in Klammern der Teil der Aufgabe oder das Objekt angegeben, für das die Handpräferenz erfragt wird.

Bitte versuchen Sie alle Fragen zu beantworten. Lassen Sie nur die Fragen offen, bei denen Sie keinerlei Erfahrung haben.

Tätigkeit		Links	Rechts
F.1	Schreiben		
F.2	Zeichnen		
F.3	Werfen		
F.4	Schere		
F.5	Zahnbürste		
F.6	Messer (ohne Gabel)		
F.7	Löffel		
F.8	Besen (obere Hand)		
F.9	Streichholz anzünden		
F.10	Kiste öffnen (Deckel)		
		Links	Rechts
F.11	Mit welchem Fuß treten Sie (z.B. einen Ball) bevorzugt?		
F.12	Wenn Sie nur ein Auge benützen, welches bevorzugen Sie?		

Die Händigkeit der Vpn wurde mithilfe des Edinburgh-Händigkeitsfragebogens (EHF) nach [Old71] erfasst, der nicht nur in Links- und Rechtshänder klassifiziert, sondern darüberhinaus über den Händigkeitsquotienten die Stärke der Händigkeit angibt.

Zwischenbefragung

 **BOSCH**

Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Zwischenbefragung zum Subjektiven Eindruck

Beschreiben Sie bitte mit Hilfe des folgenden Fragebogens ihren persönlichen Eindruck des Signals am Lenkrad, indem Sie jeweils ein Kreuz zwischen den Wortpaaren setzen. Antworten Sie bitte spontan ohne lange zu überlegen. Kreuzen Sie bitte einfach die Nullstelle an, falls Sie sich nicht entscheiden können

	-3	-2	-1	0	1	2	3	
Finsternis	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Helle
Missklang	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Wohlklang
Trübung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Klarheit
Verdross	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Annehmlichkeit
Abstoßung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Anziehung
Freudlosigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Freude

Ruhe	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bewegung
Andante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Allegro
Langsamkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Schnelligkeit
Beruhigung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Erregung
Stille	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Geräusch
Gemächlichkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Eile


Weichheit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Härte
Fügsamkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Mächtigkeit
Nachgiebigkeit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Stärke
Zurückhaltung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Nachdruck
Ergebenheit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Überlegenheit
Zartheit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Kraft

Studie **Haptische Informationsübertragung**
Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2009

1/1

Die drei affektiven Dimensionen Valenz, Erregung und Potenz der Lenkradvibration wurden mithilfe des Ertel'schen Eindrucksdifferentials (EED, nach [Ert65]) erhoben.

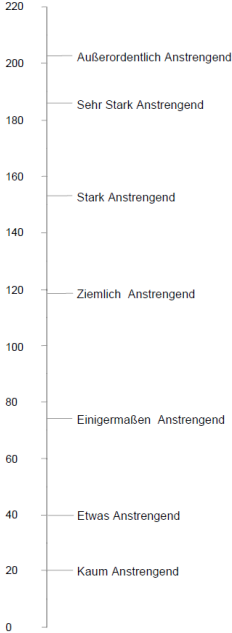
Zwischenbefragung

 **BOSCH**

Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Ihre erlebte Anstrengung


Setzen Sie bitte ein Kreuz **genau auf der Linie** je nach Stärke Ihrer gerade während der Aufgabe erlebten Anstrengung.



Studie **Haptische Informationsübertragung**
Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2009

1/1

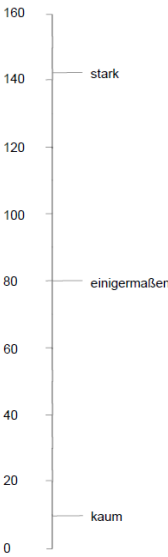
Die Erhebung der subjektiv erlebten Anstrengung erfolgte mithilfe der psychometrischen Skala nach [ENH86].

Zwischenbefragung  **BOSCH**

Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Die Präsenz des zuletzt erlebten Szenarios im Gedächtnis

Wie stark konnte Sie das Signal am Lenkrad an das zuletzt erlebte Szenario erinnern? Setzen Sie bitte ein Kreuz an entsprechender Stelle **genau auf der Linie**.




160
140 stark
120
100
80 einigermaßen
60
40
20
10 kaum
0

Studie **Haptische Informationsübertragung**
Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2009

1/1

Zur Erhebung der Präsenz der Szenarien wurde eine eigene psychometrische Skala konstruiert.

<p>Nachbefragungsbogen</p> <p>Probanden ID <input style="width: 150px;" type="text"/> (vom Versuchsleiter auszufüllen)</p> <p>Haben Sie bestimmte Lösungsstrategien verfolgt, um die Lenkaufgabe besser zu meistern? Falls ja, schildern Sie bitte kurz Ihre Strategie(n).</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	 BOSCH
<p>a) Wie haben Sie das Signal am Lenkrad empfunden? b) Konnten Sie das Signal mit bestimmten Situationen im Alltag assoziieren? Falls ja, schildern Sie bitte kurz diese Assoziation(en).</p> <p>a) _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>b) _____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	
<p>Haben Sie sonstige Anmerkungen zu der Studie?</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p> <p>_____</p>	
<p>Studie Haptische Informationsübertragung Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2009</p>	

Nachbefragungsbogen

Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Haben Sie bestimmte Lösungsstrategien verfolgt, um die Lenkaufgabe besser zu meistern? Falls ja, schildern Sie bitte kurz Ihre Strategie(n).

Wie haben Sie das Signal am Lenkrad empfunden?

Haben Sie sonstige Anmerkungen zu der Studie?

B.2. Ergebnisse

B.2.1. Stichprobenhomogenität

Tab. B.1.: Deskriptive Statistik der Kontrollvariablen und Geschlechterverteilung, getrennt nach experimentellen Gruppen

	Gruppe MS			Gruppe OS		
	N	M	SD	N	M	SD
Alter	19	33,63	5,74	22	34,09	4,84
Fahrerfahrung	19	3,12	0,44	22	2,18	0,67
Fahrstil	19	3,37	0,85	22	3,30	0,72
Computererfahrung	19	2,64	0,37	22	2,69	0,31
Grundreaktionszeit	19	322	31,21	22	328	60,03
Transfervermögen	19	3,63	0,81	22	3,94	0,39
Händigkeit	19	44	47	22	70	26
männlich	15			16		
weiblich	4			6		

B.2.2. Affektiver Gehalt der Lenkradvibration

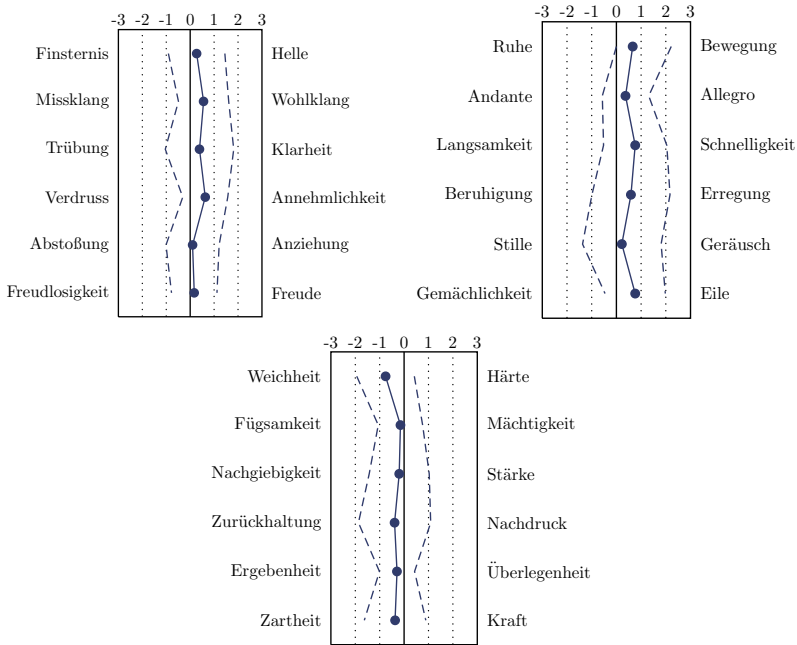


Abb. B.1.: Subjektive Bewertung der Empfindung auf den Ebenen Valenz (*oben links*), Arousal (*oben rechts*) und Potenz (*unten*). Die gestrichelten Linien markieren den Streubereich von $\pm 1SD$.

C. Anhang zu „Studie LDW“

C.1. Fragebögen

Vorstudie: Informationsbogen	S. 204 - 205
Vorstudie: Nachbefragung	S. 206
Vorbefragung: s. Vorbefragung in Studie SRC, Anhang B.1, Teilbefragungen A, B, C und F	S. 192 - 195
Zwischenbefragung zum Befinden	S. 207
Bewertung der Warnsignale	S. 208

Instruktion



Sehr geehrte Probandin, sehr geehrter Proband

Vielen Dank für Ihre Bereitschaft zur Teilnahme an unserem Fahrversuch. Damit dieser auch für Sie erfolgreich verläuft geben wir Ihnen im Folgenden eine Übersicht über den Ablauf des Versuchs und Ihre Aufgaben.

Sie befinden sich auf einer freien geraden Straße, die durch Spurmarkierungen seitlich begrenzt ist. Diese Straße wird sich während des gesamten Versuchs nicht ändern. Außer Ihnen befinden sich keine anderen Verkehrsteilnehmer auf der Straße. Sie können die Spurmarkierungen jederzeit überfahren. Ihr Fahrzeug besitzt ein Automatikgetriebe, d.h. sie müssen nicht schalten sondern lediglich Gasgeben, Bremsen und Lenken.

Auf dem Touchscreen rechts vor Ihnen können Sie zwischen vier verschiedenen Warnsignalen wählen. Diese Warnsignale sollen Sie bei drohendem Spurverlassen haptisch am Lenkrad warnen.

Ihre Aufgabe besteht nun darin, die Warnsignale nach Ihren Wünschen zu parametrieren. Versuchen Sie also die Warnsignale so einzustellen, dass diese Ihrer Meinung nach geeignet sind, um Sie bei drohendem Spurverlassen zu warnen.

Wenn Sie eines der Warnsignale wählen öffnet sich ein weiteres Fenster, in dem Ihnen alle Einstellmöglichkeiten des gewählten Signals gezeigt werden. Im unteren Bildschirmbereich sehen Sie zudem 4 Steuerbuttons. Wenn Sie ein Einstellungsfenster öffnen befinden Sie sich im Änderungsmodus, d.h. Sie können Änderungen an der Signaleinstellung vornehmen. Über den „Signalauswahl“-Button unten rechts kommen Sie jederzeit wieder zurück zur Signalauswahl. Um das Signal darzubieten können Sie entweder den Steuerbutton „Testen“ oder den Steuerbutton „Anwenden“ wählen.

Im Testmodus (Aktiviert durch Steuerbutton „Testen“) wird das Signal nach einer Pause von 1s dargeboten. Die Darbietung ist unabhängig von der aktuellen Fahrszene. Durch betätigen des Steuerbuttons „Anwenden“ wird das Signal als Spurverlassenswarnsignal aktiviert. Sobald Sie sich nun dem Spurrand nähern wird das Signal am Lenkrad ausgegeben. Änderungen in der Parametrierung sind jederzeit möglich.

Instruktion



Auf dem Startbildschirm ist neben jedem Warnsignal ein farbiger Button dargestellt. Durch Betätigung der Buttons ändern diese Ihre Farbe in der Reihenfolge rot – gelb – grün – rot. Zu Beginn sind alle Buttons rot dargestellt. Diese Buttons dienen Ihnen als Hilfestellung. Wenn Sie mit den Einstellungen eines Signals zufrieden sind, können Sie den entsprechenden Button auf grün setzen. Haben Sie Änderungen vorgenommen und sehen dennoch weiterhin Verbesserungspotential können Sie die Farbe auf gelb setzen. Die Farbwahl hat keine Auswirkung auf den Programmablauf sondern soll Ihnen lediglich als Hilfe dienen.

Während des Versuchs ist Ihnen das Vorhandensein einer Spurverlassenswarnung stets bewusst. Weiterhin lenken Sie Ihr Fahrzeug während des Versuchs bewusst in Richtung Spurrand um die Warnung auszulösen. **In der Realität werden Fahrer von Warngaben eines Spurverlassenswarnsystems häufig überrascht.** Bedenken Sie deshalb bitte u.a. folgende Fragen bei der Einstellung der Warnsignale:

1. Wie wirkt dieses Warnsignal, wenn es unerwartet aktiviert wird und Sie nicht mit der Darbietung rechnen?
2. Wie wirkt dieses Warnsignal, wenn Fahrer abgelenkt oder eingeschlafen sind?
3. Wie wirkt dieses Warnsignal, wenn Fahrer das Lenkrad nicht beidhändig festhalten, sondern etwa nur eine Hand locker aufgelegt wird?

Versuchen Sie, sich in die normale Fahrsituation hineinzuversetzen und das Warnsignal aus dieser normalen Situation heraus zu beurteilen und einzustellen.

Vielen Dank und viel Spaß.

Nachbefragung

Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Im Fahrversuch sollten Sie die Parameter von vier Warnsignalen nach Ihren Wünschen anpassen.

- | | |
|----|--|
| 1 | Nennen Sie bitte drei Eigenschaften, die ein geeignetes Spurverlassenswarnsignal Ihrer Meinung nach aufweisen sollte. |
| 1. | <input type="text"/> |
| 2. | <input type="text"/> |
| 3. | <input type="text"/> |
| 2 | Nennen Sie bitte drei Eigenschaften, die ein ungeeignetes Spurverlassenswarnsignal Ihrer Meinung nach aufweist. |
| 1. | <input type="text"/> |
| 2. | <input type="text"/> |
| 3. | <input type="text"/> |

Zwischenbefragung zum Befinden




Probanden ID (vom Versuchsleiter auszufüllen)

Bitte füllen Sie diesen Fragebogen vollständig aus. Kreuzen Sie dazu bitte die zutreffenden Antworten in den dafür vorgesehenen Kästchen an.

Wie haben Sie sich während des letzten Versuchsabschnitts gefühlt?

Machen Sie bitte in jeder Zeile ein Kreuz

		Stimmt völlig				Stimmt gar nicht
1.	Ich fühlte mich normal.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	Ich war irritiert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	Mir war schwindelig.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	Mir war übel.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5.	Ich fühlte mich nicht gut.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6.	Ich hatte Kopfschmerzen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7.	Ich hatte Schwierigkeiten, Dinge zu fokussieren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8.	Ich fühlte mich müde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9.	Meine Augen wurden überanstrengt	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10.	Ich hatte Schwierigkeiten, mich zu konzentrieren	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11.	Ich empfand generelles Unbehagen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

 **BOSCH**

Bewertung des Warnsignals

E1	Empfinden Sie dieses Warnsignal als Hilfe beim Spurhalten?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		hilfreich	eher hilfreich	weder noch	eher nicht hilfreich	nicht hilfreich

E2	Würden Sie ein Spurverlassenswarnsystem mit diesem Warnsignal in Ihrem Fahrzeug verwenden?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		dauerhaft abschalten	zeitweise abschalten	weiß nicht	zeitweise verwenden	dauerhaft verwenden

Ein Spurverlassenswarner warnt nicht nur in kritischen Situationen. Warnungen können bspw. auch bei absichtlichem Kurvenschneiden oder in Baustellenbereichen ausgelöst werden.

E3	Würden Sie mit diesem Warnsignal Warnungen bei absichtlichem Kurvenschneiden tolerieren?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		nicht tolerieren	eher nicht tolerieren	weiß nicht	eher tolerieren	tolerieren

E4	Würden Sie tolerieren, wenn auf freier Strecke ohne für Sie ersichtlichen Grund eine Warnung mit diesem Warnsignal ausgegeben wird?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		nicht tolerieren	eher nicht tolerieren	weiß nicht	eher tolerieren	tolerieren

Bitte geben Sie Ihren Gesamteindruck an.

E5	Alles in allem, ist das haptische Signal geeignet, um Sie vor Spurverlassen zu warnen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
		ungeeignet				geeignet	

-- Bitte zweite Seite ausfüllen --

Studie **Haptische Informationsübertragung II**
Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2010

1/1

Die Bewertung der Signale erfolgte über eine grafische Benutzeroberfläche auf dem Touchscreen im Simulator-Mockup. Die hier aufgeführte Form dient lediglich der inhaltlichen Darstellung der Fragen.

Bewertung des Warnsignals



Bitte beurteilen Sie nun das haptische Warnsignal mit Hilfe der nachfolgenden Adjektivpaare. Markieren Sie möglichst spontan die Position zwischen den Wortpaaren, die Ihrer Meinung nach das Warnsignal am besten beschreibt.

Machen Sie bitte in jeder Zeile ein Kreuz.

Ich empfinde das haptische Spurverlassenswarnsignal als:									
M1	deutlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	undeutlich
M2	aufregend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	beruhigend
M3	vertraut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	fremd
M4	unverständlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	verständlich
M5	unaufdringlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	aufdringlich
M6	stark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	schwach
M7	unauffällig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	auffällig
M8	einfach	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	komplex
M9	eindeutig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	mehrdeutig
M10	schwammig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	präzise
M11	unangemessen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	angemessen
M12	verwirrend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	klar
M13	kontrollierbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unkontrollierbar
M14	angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unangenehm
M15	wertig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	billig
M16	zuverlässig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unzuverlässig

C.2. Ergebnisse

C.2.1. Statistiken der Eigenschaften der haptischen Signale

Tab. C.1.: Deskriptive Statistik der Eigenschaften

Eigenschaft	Pole	M	SE	Min	Max
E1: Nutzen	1 = hilfreich 5 = nicht hilfreich	2,15	0,094	1	5
E2: Verwendung	1 = dauerhaft abschalten 5 = dauerhaft verwenden	2,67	0,118	1	5
E3: Toleranz Kurve	1 = tolerieren 5 = nicht tolerieren	3,22	0,115	1	5
E4: Toleranz Allgemein	1 = tolerieren 5 = nicht tolerieren	3,94	0,097	1	5
E5: Eignung	1 = geeignet 5 = ungeeignet	2,43	0,111	1	5

Tab. C.2.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA): Hinsichtlich welcher Eigenschaften existieren statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen Signalen?

Merkmal	Quadrat-summe	df	Mittel d. Quadrate	F	Sign.
E1: Nutzen	16,674	5	3,335	2,952	0,015 *
E2: Verwendung	18,319	5	3,664	1,963	0,088
E3: Toleranz Kurve	50,435	5	10,087	6,689	0,000 **
E4: Toleranz Allgemein	33,014	5	6,603	6,031	0,000 **
E5: Eignung	29,913	5	5,983	3,909	0,001 *

Tab. C.3.: Post-hoc Tukey-Tests der Eigenschaften: Welche Signale (1-6) sind für die signifikanten Unterschiede in einzelnen Eigenschaften (vgl. Tab. C.2) verantwortlich? (Hinweis: es werden lediglich diejenigen Eigenschaften betrachtet, bei denen statistisch bedeutsame Unterschiede festgestellt werden konnten).

		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
E1: Nutzen	(1)	-	.467	.236	.558	.068	.006 *
	(2)	.467	-	.998	1.0	.926	.467
	(3)	.236	.998	-	.994	.994	.735
	(4)	.558	1.0	.994	-	.877	.382
	(5)	.068	.926	.994	.877	-	.961
	(6)	.006 *	.467	.735	.382	.961	-
E3: Toleranz Kurve	(1)	-	.125	.773	.018 *	.000 **	.959
	(2)	.125	-	.836	.979	.125	.547
	(3)	.773	.836	-	.394	.004 *	.997
	(4)	.018 *	.979	.394	-	.469	.163
	(5)	.000 **	.125	.004 *	.469	-	.001 **
	(6)	.959	.547	.997	.163	.001 **	-
E4: Toleranz Allgemein	(1)	-	.287	.998	.018 *	.001 **	.998
	(2)	.287	-	.540	.869	.287	.540
	(3)	.998	.540	-	.061	.003 *	1.0
	(4)	.018 *	.869	.061	-	.922	.061
	(5)	.001 **	.287	.003 *	.922	-	.003 *
	(6)	.998	.540	1.0	.061	.003 *	-
E5: Eignung	(1)	-	.216	.170	.633	.006 *	.003 *
	(2)	.216	-	1.0	.980	.778	.633
	(3)	.170	1.0	-	.961	.840	.709
	(4)	.633	.980	.961	-	.333	.216
	(5)	.006 *	.778	.840	.333	-	1.0
	(6)	.003 *	.633	.709	.216	1.0	-

C.2.2. Statistiken der Merkmale des semantischen Differentials

Tab. C.4.: Deskriptive Statistik der Merkmale

Merkmal	Pole	M	SE	Min	Max
M1: Deutlichkeit	-3 = deutlich +3 = undeutlich	-1,72	0,13	-3	3
M2: Aufregung	-3 = beruhigend +3 = aufregend	0,83	0,12	-3	3
M3: Vertrautheit	-3 = vertraut +3 = fremd	-0,44	0,15	-3	3
M4: Verständlichkeit	-3 = verständlich +3 = unverständl.	-1,66	0,14	-3	3
M5: Aufdringlichkeit	-3 = unaufdringl. +3 = aufdringlich	0,83	0,13	-3	3
M6: Stärke	-3 = schwach +3 = stark	1,41	0,12	-3	3
M7: Auffälligkeit	-3 = auffällig +3 = unauffällig	-1,57	0,12	-3	3
M8: Einfachheit	-3 = einfach +3 = komplex	-1,08	0,12	-3	3
M9: Eindeutigkeit	-3 = eindeutig +3 = mehrdeutig	-1,03	0,17	-3	3
M10: Präzision	-3 = präzise +3 = schwammig	-0,83	0,14	-3	3
M11: Angemessenheit	-3 = angemessen +3 = unangemessen	-0,48	0,15	-3	3
M12: Klarheit	-3 = klar +3 = verwirrend	-0,95	0,14	-3	3
M13: Kontrolle	-3 = kontrollierbar +3 = unkontroll.	-0,80	0,14	-3	3
M14: Komfort	-3 = angenehm +3 = unangenehm	0,06	0,16	-3	3
M15: Wertigkeit	-3 = wertig +3 = billig	-0,86	0,12	-3	3
M16: Zuverlässigkeit	-3 = zuverlässig +3 = unzuverlässig	-1,0	0,12	-3	3

Tab. C.5.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA): Hinsichtlich welcher Merkmale existieren statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen Signalen?

Merkmal	Quadrat- summe	df	Mittel d. Quadrate	F	Sign.
M1: Deutlichkeit	31,891	5	6,378	2,769	0,021 *
M2: Aufregung	14,696	5	2,939	1,420	0,221
M3: Vertrautheit	15,862	5	3,172	1,052	0,390
M4: Verständlichkeit	37,101	5	7,420	2,803	0,019 *
M5: Aufdringlichkeit	70,870	5	14,174	7,281	0,000 **
M6: Stärke	70,841	5	14,168	8,721	0,000 **
M7: Auffälligkeit	44,435	5	8,887	5,203	0,000 **
M8: Einfachheit	13,080	5	2,616	1,265	0,283
M9: Eindeutigkeit	37,188	5	7,438	2,060	0,074
M10: Präzision	31,391	5	6,278	2,478	0,035 *
M11: Angemessenheit	38,087	5	7,617	2,589	0,029 *
M12: Klarheit	30,471	5	6,094	2,560	0,030 *
M13: Kontrolle	72,761	5	14,552	6,138	0,000 **
M14: Komfort	48,493	5	9,699	3,161	0,010 *
M15: Wertigkeit	19,014	5	3,803	1,859	0,106
M16: Zuverlässigkeit	13,652	5	2,730	1,440	0,214

Tab. C.6.: Post-hoc Tukey-Tests der Merkmale: Welche Signale (1-6) sind für die signifikanten Unterschiede in einzelnen Merkmalen (vgl. Tab. C.5) verantwortlich? (Hinweis: es werden lediglich diejenigen Eigenschaften betrachtet, bei denen statistisch bedeutsame Unterschiede festgestellt werden konnten).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
M1:	(1)	-	.971	1.0	.189	.566
Deutlich-	(2)	.971	-	.893	.630	.952
keit	(3)	1.0	.893	-	.099	.381
	(4)	.189	.630	.099	-	.984
	(5)	.566	.952	.381	.984	-
	(6)	.984	.692	.999	.036 *	.189

		Fortsetzung					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
M4: Verständ- lichkeit	(1)	-	1.0	.847	.918	.944	.148
	(2)	1.0	-	.886	.886	.964	.180
	(3)	.847	.886	-	.256	1.0	.801
	(4)	.918	.886	.256	-	.405	.010 *
	(5)	.944	.964	1.0	.405	-	.639
	(6)	148	.180	.801	.010 *	.639	-
M5: Aufdring- lichkeit	(1)	-	.958	.977	.031 *	.000 **	1.0
	(2)	.958	-	1.0	.236	.002 *	.977
	(3)	.977	1.0	-	.192	.001 **	.988
	(4)	.031 *	.236	.192	-	.540	.042 *
	(5)	.000 **	.002 *	.001 **	.540	-	.000 **
	(6)	1.0	.977	.988	.042	.000 **	-
M6: Stärke	(1)	-	.982	.734	.026 *	.004 *	.965
	(2)	.982	-	.303	.154	.036 *	.662
	(3)	.734	.303	-	.000 **	.000 **	.992
	(4)	.026 *	.154	.000 **	-	.992	.002 *
	(5)	.004 *	.036 *	.000 **	.992	-	.000 **
	(6)	.965	.662	.992	.002 *	.000 **	-
M7: Auffällig- keit	(1)	-	.945	.945	.331	.081	.754
	(2)	.945	-	.466	.869	.466	.220
	(3)	.945	.466	-	.045 *	.006 *	.998
	(4)	.331	.869	.045 *	-	.984	.012 *
	(5)	.081	.466	.006 *	.984	-	.001 **
	(6)	.754	.220	.998	.012 *	.001 **	-
M10: Präzision	(1)	-	.834	1.0	.733	1.0	.556
	(2)	.834	-	.676	1.0	.786	.053
	(3)	1.0	.676	-	.556	1.0	.733
	(4)	.733	1.0	.556	-	.676	.032 *
	(5)	1.0	.786	1.0	.676	-	.617
	(6)	.556	.053	.733	.032 *	.617	-
M11: Angemes- senheit	(1)	-	.578	.578	.313	.013 *	.089
	(2)	.578	-	1.0	.998	.522	.907
	(3)	.578	1.0	-	.998	.522	.907
	(4)	.313	.998	.998	-	.790	.991
	(5)	.013 *	.522	.522	.790	-	.983
	(6)	.089	.907	.907	.991	.983	-
M12: Klarheit	(1)	-	.993	.993	.997	.521	.292
	(2)	.993	-	.861	1.0	.204	.087
	(3)	.993	.861	-	.899	.861	.646
	(4)	.997	1.0	.899	-	.246	.109
	(5)	.521	.204	.861	.246	-	.999
	(6)	.292	.087	.646	.109	.999	-

		Fortsetzung					
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
M13: Kontrolle	(1)	-	.013 *	.762	.001 **	.000 **	.041 *
	(2)	.013 *	-	.342	.985	.762	.999
	(3)	.762	.342	-	.086	.013 *	.582
	(4)	.001 **	.985	.086	-	.985	.899
	(5)	.000 **	.762	.013 *	.985	-	.519
	(6)	.041 *	.999	.582	.899	.519	-
M14: Komfort	(1)	-	.213	.545	.102	.003 *	.601
	(2)	.213	-	.992	.999	.655	.985
	(3)	.545	.992	-	.939	.292	1.0
	(4)	.102	.999	.939	-	.846	.914
	(5)	.003 *	.655	.292	.846	-	.250
	(6)	.601	.985	1.0	.914	.250	-

Tab. C.7.: Erklärte Gesamtvarianz in Abhängigkeit von der Komponentenanzahl n (Hauptkomponentenanalyse)

n	Anfängliche Eigenwerte		
	Gesamt	% der Var.	Kum. %
1	6,994	42,712	43,712
2	3,600	22,497	66,209
3	0,912	5,697	71,907
4	0,801	5,003	76,910
5	0,618	3,860	80,771
6	0,472	2,949	83,719
7	0,436	2,722	86,441
8	0,360	2,248	88,689
9	0,349	2,182	90,871
10	0,303	1,894	92,765
11	0,290	1,816	94,581
12	0,215	1,347	95,928
13	0,203	1,269	97,197
14	0,182	1,138	98,335
15	0,154	0,963	99,298
16	0,112	0,702	100,000

Tab. C.8.: Komponentenmatrix der Faktorenanalyse (zwei extrahierte Komponenten)

Merkmal	Komponente	
	1	2
M12	,876	,104
M9	,825	,217
M11	,822	-,154
M10	,814	,335
M4	,771	,346
M16	,756	
M15	,736	,269
M14	,704	-,502
M3	,690	
M13	,662	-,430
M8	,651	-,267
M6	,176	,829
M7	,125	,809
M5	-,426	,713
M2	-,441	,656
M1	,495	,646

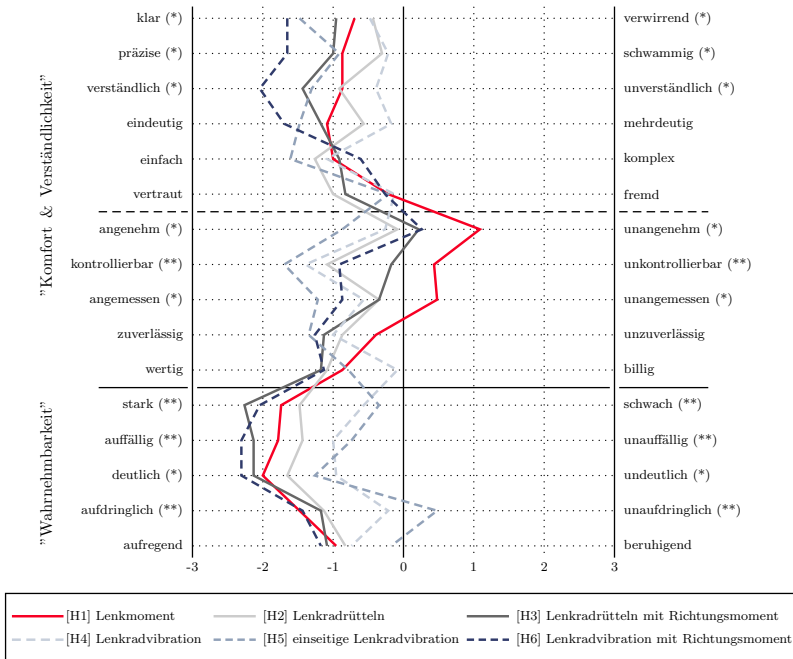


Abb. C.1.: Merkmale der Spurverlassenswarnsignale:


Profilplot der Warnsignale auf den Merkmalen des semantischen Differentials. Hinsichtlich einiger Merkmale existieren signifikante ($p < .05$, *) bzw. hoch signifikante ($p < .001$, **) Unterschiede zwischen einzelnen Signalen. Die Merkmale über der durchgezogenen horizontalen Linie laden hauptsächlich auf den 1. Faktor, der als „Verständlichkeit & Komfort“ interpretiert werden kann (die gestrichelte Linie trennt die Unterfaktoren), die unteren hauptsächlich auf den Faktor „Wahrnehmbarkeit“.

D. Anhang zu „Studie FCW“

D.1. Fragebögen

Vorbefragung: s. Vorbefragung in Studie SRC, Anhang B.1, Teilbefragungen A, B, C und F	S. 192 - 195
Fragebogen nach Versuchsphase „Fahrspaß & Fahrkomfort“: s. Fragebogen zur Bewertung der Signale in Studie LDW ¹ , Anhang C.1	S. 208
Nachbefragung	S. 218 - 219

¹Bei der Bewertung anhand des semantischen Differentials wurden lediglich diejenigen Merkmale verwendet, hinsichtlich derer sich in der LDW-Studie (hoch) signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Signalen ergeben.

<p>Nachbefragungsbogen</p> <p style="text-align: right;"> BOSCH</p> <p>Probanden ID <input style="width: 150px;" type="text"/> (vom Versuchsleiter auszufüllen)</p> <p>Denken Sie an die eben erlebte Situation mit dem plötzlich abbremsenden Fahrzeug</p>	
1	<p>Wurden Sie vor der Kollision durch ein Vibrieren oder Rütteln am Lenkrad gewarnt?</p> <p><input type="checkbox"/> Ja, ich wurde gewarnt</p> <p><input type="checkbox"/> Nein, ich wurde nicht gewarnt</p> <p><input type="checkbox"/> Weiß nicht</p>
2	<p>Wurden Sie vor der Kollision durch einen Warn- oder Hinweiston gewarnt?</p> <p><input type="checkbox"/> Ja, ich wurde gewarnt</p> <p><input type="checkbox"/> Nein, ich wurde nicht gewarnt</p> <p><input type="checkbox"/> Weiß nicht</p>
3	<p>Wurden Sie vor der Kollision durch eine Warnanzeige gewarnt?</p> <p><input type="checkbox"/> Ja, ich wurde gewarnt</p> <p><input type="checkbox"/> Nein, ich wurde nicht gewarnt</p> <p><input type="checkbox"/> Weiß nicht</p>


Studie **Haptische Informationsübertragung III**

Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2010

1/2

Die drei Fragen wurden randomisiert

Nachbefragungsbogen

 **BOSCH**

5 Wie würden Sie das haptische Warnsignal am ehesten beschreiben?

dezentler Hinweisstarker Eingriff

6 Hat das haptische Signal Ihnen die Richtung übermittelt, in die Sie ausweichen sollen?

☐ Ja, ...

☐ ... nach links

☐ ... nach rechts

☐ ... aber ich weiß nicht mehr in welche Richtung

☐ Nein, es hat keine Richtung übermittelt

☐ Weiß nicht

Bitte beurteilen Sie nun das haptische Warnsignal mit Hilfe der nachfolgenden Adjektivpaare. Markieren Sie möglichst spontan die Position zwischen den Wortpaaren, die Ihrer Meinung nach das Warnsignal am besten beschreibt.

Machen Sie bitte in jeder Zeile ein Kreuz.

Ich empfinde das haptische Warnsignal als:									
7	deutlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	undeutlich
8	unverständlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	verständlich
9	unaufdringlich	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	aufdringlich
10	stark	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	schwach
11	unauffällig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	auffällig
12	schwammig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	präzise
13	unangemessen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	angemessen
14	verwirrend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	klar
15	kontrollierbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unkontrollierbar
16	angenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	unangenehm

Studie **Haptische Informationsübertragung III**
Schwieberdingen, Robert Bosch GmbH, 2010

2/2

Diese Seite wird nur ausgegeben, wenn die Vpn angeben, vor der Kollision durch ein Vibrieren oder Rütteln am Lenkrad gewarnt worden zu sein.

D.2. Ergebnisse

D.2.1. Stichprobenhomogenität

Tab. D.1.: Zusammensetzung der experimentellen Gruppen

	A	B	C	D	Σ
Anzahl Vpn	18	18	18	17	71
davon „Gernfahrer“	8	8	9	10	35
davon „Ungernfahrer“	10	10	9	7	36
männlich	17	13	16	16	62
weiblich	1	5	2	1	9

Tab. D.2.: Deskriptive Statistik der Kontrollvariablen (KV)

		A	B	C	D
Alter:	M	39,33	39,61	38,56	39,52
	SD	7,00	6,56	6,22	8,70
Fahrerfahrung:	M	0,82	0,84	0,82	0,81
	SD	0,12	0,12	0,14	0,15
Fahrstil:	M	0,64	0,59	0,59	0,61
	SD	0,15	0,17	0,10	0,16
Händigkeit:	M	56,03	61,12	79,51	49,19
	SD	53,16	41,60	14,16	47,70

Tab. D.3.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der KV

KV	Quadrat-summe	df	Mittel d. Quadrate	F	Sign.
Alter	12,479	3	4,160	0,081	0,970
Fahrerfahrung	0,008	3	0,003	0,151	0,929
Fahrstil	0,036	3	0,012	0,543	0,655
Händigkeit	8954,348	3	2984,783	1,703	0,174

D.2.2. Ausweichsituation

Tab. D.4.: Deskriptive Statistik der kontrollierten kinematischen Größen zum Ausweichzeitpunkt getrennt nach experimentellen Gruppen (Angaben außerhalb der Klammern beziehen sich auf Fall 1, Angaben innerhalb der Klammern auf Fall 2).

		A	B	C	D
Geschw. [km/h]	N	15 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	78,4 (77,7)	78,1 (78,8)	80,4 (80,3)	81,2 (81,8)
	SD	3,13 (2,78)	3,40 (3,40)	2,83 (3,17)	4,78 (4,70)
Spurablage [m]	N	15 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	1,66 (1,62)	1,81 (1,86)	1,72 (1,70)	1,68 (1,68)
	SD	0,25 (0,23)	0,26 (0,25)	0,27 (0,24)	0,22 (0,23)
Bremsped. [%]	N	15 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	SD	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
Gasped. [%]	N	15 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	57,4 (57,3)	53,1 (50,5)	61,4 (62,5)	63,8 (61,9)
	SD	4,66 (3,97)	16,22 (17,82)	10,29 (11,61)	12,28 (12,04)
Lenkwinkel [°]	N	15 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	1,41 (1,23)	1,73 (1,55)	1,28 (1,38)	1,68 (1,60)
	SD	0,70 (0,79)	0,71 (0,54)	0,93 (0,81)	0,91 (0,91)

Tab. D.5.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der kontrollierten kinematischen Größen zum Ausweichzeitpunkt

	Größe	Quadratsumme	df	Mittel d. Quadrate	F	Sign.
<i>Fall 1:</i>	Geschwindigkeit	95,716	3	31,905	2,431	0,076
	Spurablage	0,173	3	0,058	0,931	0,433
	Gaspedalstellung	888,879	3	296,293	2,258	0,093
	Lenkwinkel	1,840	3	0,613	0,923	0,437
<i>Fall 2:</i>	Geschwindigkeit	102,171	3	34,057	2,553	0,070
	Spurablage	0,332	3	0,111	2,006	0,130
	Gaspedalstellung	951,602	3	317,201	2,076	0,120
	Lenkwinkel	0,902	3	0,301	0,491	0,690

Tab. D.6.: Reaktionen der Vpn in der Ausweichsituation (Fall 1, Fall 2 in Klammern).

Reaktion	A	B	C	D	Σ
nur Bremsen	12 (8)	12 (9)	11 (8)	12 (11)	47 (36)
nur Lenken	1 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0)
Bremsen & Lenken	2 (2)	1 (1)	2 (2)	2 (1)	7 (6)

Tab. D.7.: Deskriptive Statistik der Bremsreaktion zum Ausweichzeitpunkt (reine Brems- sowie kombinierte Brems-Lenk-Reaktionen. Fall 1, Fall 2 in Klammern).

		A	B	C	D
Bremsreaktionszeit [ms]:	N	14 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	1290 (1334)	985 (880)	1195 (1142)	1091 (1045)
	SD	397 (408)	364 (338)	306 (289)	413 (306)
	Med.	1125 (1300)	960 (895)	1180 (1175)	1065 (1065)
max. Bremspedalbetät. [N]:	N	14 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	268 (259)	278 (266)	339 (333)	312 (317)
	SD	81 (92)	87 (95)	25 (25)	74 (72)
	Med.	287 (270)	312 (295)	347 (338)	355 (355)
Geschw.-abbau [km/h]	N	14 (10)	13 (10)	13 (10)	14 (12)
	M	22 (20)	36 (39)	26 (26)	32 (33)
	SD	13 (12)	21 (24)	10 (8)	20 (18)
	Med.	19 (18)	29 (39)	26 (27)	27 (27)

Tab. D.8.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der Beschreibungsmaße der Bremsreaktion (Fall 1, Fall 2 in Klammern).

Maß	Signifikanz	
	Faktor Habituation (Vgl. A, B, C)	Faktor Signal (Vgl. A, C, D)
Bremsreaktionszeit	.095 (.024*)	.389 (.147)
max. Bremspedalbetätigung	.030* (.084)	.027* (.059)
Geschwindigkeitsabbau	.073 (.033*)	.232 (.094)

Tab. D.9.: Post-hoc Tukey-Tests der Maße der Bremsreaktion:
Welche Gruppen sind für die beobachteten signifikanten Unterschiede (Tab. D.8) in den Maßen verantwortlich? (Fall 1, Fall 2 in Klammern).

	Faktor Habituation		
	(A)	(B)	(C)
Bremsreaktionszeit	(A) - (B) .084 (.019*) (C) .771 (.445)	.084 (.019*) - .310 (.231)	.771 (.445) .310 (.231) -
max. Bremspedal- betätigung	(A) - (B) .930 (.979) (C) .035* (.106)	.930 (.979) - .086 (.154)	.035* (.106) .086 (.154) -
Geschwindigkeits- abbau	(A) - (B) .073 (.029*) (C) .877 (.692)	.073 (.029*) - .202 (.158)	.877 (.692) .202 (.158) -
	Faktor Signal		
	(A)	(C)	(D)
Bremsreaktionszeit	(A) - (C) .790 (.420) (D) .355 (.129)	.790 (.420) - .759 (.781)	.355 (.129) .759 (.781) -
max. Bremspedal- betätigung	(A) - (C) .022* (.062) (D) .191 (.149)	.022* (.062) - .557 (.850)	.191 (.149) .557 (.850) -
Geschwindigkeits- abbau	(A) - (C) .869 (.613) (D) .217 (.079)	.869 (.613) - .481 (.429)	.217 (.079) .481 (.429) -

D.2.3. Falschwarnung

Tab. D.10.: Deskriptive Statistik der Probandenreaktionen auf die Falschwarnung

		Gruppen		
		A+B	C	D
Aktivität am Lenkrad ... während der Warnung [°]	N	36	18	17
	M	0,32	0,79	1,65
	SD	0,20	0,99	0,86
	Median	0,26	0,50	1,30
... nach der Warnung [°]	N	36	18	17
	M	0,34	0,68	0,96
	SD	0,22	0,39	0,47
	Median	0,30	0,61	0,91
Änderung der Spurablage ... während der Warnung [m]	N	36	18	17
	M	-0,05	-0,10	-0,17
	SD	0,18	0,14	0,15
	Median	-0,04	-0,08	-0,12
... nach der Warnung [m]	N	36	18	17
	M	-0,06	-0,05	0,17
	SD	0,12	0,33	0,21
	Median	-0,04	-0,01	0,20
Aktivität am Gaspedal ... während der Warnung [%-Punkte]	N	36	18	17
	M	-1,88	1,73	-0,81
	SD	4,52	8,68	2,28
	Median	0	0	0
... nach der Warnung [%-Punkte]	N	36	18	17
	M	-1,16	-0,53	-0,47
	SD	3,24	1,38	1,30
	Median	0	0	0

Tab. D.11.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der Reaktionen auf die Falschwarnung

Größe		Signifikanz
Aktivität am Lenkrad	... während der Warnung	.000 **
	... nach der Warnung	.000 **
Änderung der Spurablage	... während der Warnung	.058
	... nach der Warnung	.001 **
Aktivität am Gaspedal	... während der Warnung	.085
	... nach der Warnung	.541

Tab. D.12.: Post-hoc Tukey-Tests der Fahrerreaktionen auf die Falschwarnung: Welche Gruppen sind für die beobachteten signifikanten Unterschiede in den Maßen verantwortlich? (Berechnet sind lediglich diejenigen Fälle, in denen signifikante Unterschiede beobachtet werden, vgl. Tab. D.11)

	(A)+(B)	(C)	(D)
Aktivität am Lenkrad während der Warnung	(A)+(B) -	.042 *	.000 **
	(C) .042 *	-	.001 **
	(D) .000 **	.001 **	-
Aktivität am Lenkrad nach der Warnung	(A)+(B) -	.003 *	.000 **
	(C) .003 *	-	.044 *
	(D) .000 **	.044 *	-
Änderung der Spurablage nach der Warnung	(A)+(B) -	.981	.001 **
	(C) .981	-	.007 *
	(D) .001 **	.007 *	-

D.2.4. Spurverlassenswarnung

Tab. D.13.: Deskriptive Statistik des Spurhalteverhaltens im Versuchsteil „Spaß & Komfort“

		A+B	C	D
Anzahl Spurverlassensereignisse	N	42	19	18
	M	19,21	13,16	18,89
	SD	15,46	9,38	23,73
	Median	15,5	12	12,5
Mittlere Spurverlassensdauer [ms]	N	42	19	18
	M	2789	1526	1202
	SD	2426	441	349
	Median	1917	1502	1142

Tab. D.14.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) des Spurhalteverhaltens im Versuchsteil „Spaß & Komfort“

Größe	Signifikanz
Anzahl Spurverlassensereignisse	.398
Mittlere Spurverlassensdauer	.003 *

Tab. D.15.: Post-hoc Tukey-Tests des Spurhalteverhaltens im Versuchsteil „Spaß & Komfort“. Welche Gruppen sind für den signifikanten Unterschied in der mittleren Spurverlassensdauer verantwortlich? (vgl. Tab. D.14)

		(A)+(B)	(C)	(D)
Mittlere Spurverlassensdauer	(A)+(B)	-	.035 *	.007 *
	(C)	.035 *	-	.848
	(D)	.007 *	.848	-

Tab. D.16.: Deskriptive Statistik der Eigenschaften der haptischen Spurverlassenswarnsignale

	Eigenschaft	Pole	M	SD	Min	Max
E1:	Nutzen	1 = hilfreich 5 = nicht hilfreich	1,76	0,955	1	4
E2:	Verwendung	1 = dauerhaft abschalten 5 = dauerhaft verwenden	4,03	1,000	2	5
E3:	Toleranz Kurve	1 = tolerieren 5 = nicht tolerieren	2,29	1,169	1	5
E4:	Toleranz Allgemein	1 = tolerieren 5 = nicht tolerieren	3,88	1,008	1	4
E5:	Eignung	1 = geeignet 5 = ungeeignet	1,50	0,788	1	5

Tab. D.17.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der Eigenschaften

Merkmal	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
E1: Nutzen	1	1,059	1,166	.288
E2: Verwendung	1	0,265	0,259	.614
E3: Toleranz Kurve	1	1,882	1,395	.246
E4: Toleranz Allgemein	1	1,882	1,903	.177
E5: Eignung	1	0,735	1,190	.283

Tab. D.18.: Deskriptive Statistik der Merkmale des semantischen Differentials zur Bewertung der Spurverlassenswarnsignale

Merkmal	Pole	M	SD	Min	Max
M1: Deutlichkeit	-3 = deutlich +3 = undeutlich	-2,65	0.60	-3	-1
M2: Verständlichkeit	-3 = verständlich +3 = unverständl.	-2,41	1.05	-3	2

Fortsetzung						
Merkmal	Pole		M	SD	Min	Max
M3: Aufdringlichkeit	-3 =	aufdringlich	1,21	0,13	-2	3
	+3 =	unaufdringl.				
M4: Stärke	-3 =	stark	-0,65	0,95	-3	1
	+3 =	schwach				
M5: Auffälligkeit	-3 =	auffällig	-1,41	1,21	-3	2
	+3 =	unauffällig				
M6: Präzision	-3 =	präzise	-1,79	1,15	-3	1
	+3 =	schwammig				
M7: Angemessenheit	-3 =	angemessen	-2,0	0,15	-3	2
	+3 =	unangemessen				
M8: Klarheit	-3 =	klar	-2,15	1,16	-3	2
	+3 =	verwirrend				
M9: Kontrolle	-3 =	kontrollierbar	-1,59	1,54	-3	3
	+3 =	unkontrollierb.				
M10: Komfort	-3 =	angenehm	-1,59	1,28	-3	1
	+3 =	unangenehm				

Tab. D.19.: Einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) der Merkmale: Hinsichtlich welcher Merkmale des semantischen Differentials existieren statistisch bedeutsame Unterschiede zwischen den haptischen Spurverlassenswarnsignalen?

Merkmal	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
M1: Deutlichkeit	1	1,059	3,165	.085
M2: Verständlichkeit	1	2,941	2,827	.102
M3: Aufdringlichkeit	1	1,441	0,767	.388
M4: Stärke	1	1,059	1,180	.285
M5: Auffälligkeit	1	2,941	2,078	.159
M6: Präzision	1	0,735	0,549	.464
M7: Angemessenheit	1	0,471	0,271	.606
M8: Klarheit	1	0,735	0,541	.468
M9: Kontrolle	1	0,000	0,000	1.000
M10: Komfort	1	1,059	0,637	.431

E. Anhang zur Studie „Interpretation von Lenkradvibrationen“

0	Gar nichts
0,3	
0,5	Extrem schwach
0,7	
1	Sehr schwach
1,5	
2	Schwach
2,5	
3	Mäßig
4	
5	Stark
6	
7	Sehr stark
8	
9	
10	Extrem stark
11	
↗	
●	Absolutes Maximum

Anweisung. Bitte vermitteln Sie anhand dieser Skala, wie stark Ihre Empfindung ist. Schauen Sie zuerst auf die sprachlichen Ausdrücke. Gehen Sie von diesen aus und wählen Sie dann eine Ziffer. Zehn (10) oder „Extrem stark“ ist ein sehr wichtiges Intensitätsniveau. Es stellt das stärkste Erlebnis oder Gefühl dar, dass Sie jemals gehabt haben.

Wenn Ihre Empfindung oder Ihr Gefühl „Sehr schwach“ ist, sagen Sie „1“, wenn Sie „Mäßig“ ist, sagen Sie 3. Denken Sie daran, dass „Mäßig“ 3 ist, also schwächer als „Stark“. Wenn die Empfindung „Stark“ ist, sagen Sie „5“. Denken Sie daran, dass „Stark“ ungefähr die Hälfte von „Extrem Stark“ ist. Wenn das Gefühl „Sehr stark“ ist, wählen Sie eine Ziffer zwischen 6 und 8. Wenn Ihre Empfindung oder Ihr Gefühl stärker ist als „10“, „Extrem stark“, können Sie eine größere Ziffer angeben, z. B. 12 oder höher (aus diesem Grund ist „Absolutes Maximum“ mit einem Punkt versehen. Es ist sehr wichtig, dass Sie das angeben, was Sie tatsächlich empfinden und nicht das, was Sie glauben, angeben zu müssen. Versuchen Sie, so aufrichtig und spontan wie möglich zu antworten und die Empfindung weder zu unterschätzen noch zu überschätzen. Gehen Sie von den Wörtern aus und wählen Sie dann eine Ziffer.

Abb. E.1.: Borg CR10 Skala

Tab. E.1.: Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen. Beschleunigungswerte in m/s^2 (r.m.s.) Zur Datenaufzeichnung wurde ein Biopac-Messsystem (BIOPAC MP-150) mit dreiachsigen Beschleunigungssensoren (Typ TRIAX TSD-109F) verwendet. Gemessen wurden die Beschleunigungen am Lenkrad an der linken und rechten Hand (Messort gemäß DIN EN ISO 5349-2) in allen drei Raumrichtungen. Aufgeführt sind die Mittelwerte (jeweils 2 Messungen an beiden Händen) der Beschleunigungen in z-Richtung gemäß DIN EN ISO 5349-1.

f [Hz]	a (eingestellt)			
	25%	50%	75%	100%
42	0,352	0,889	1,341	2,065
60	4,931	16,910	28,023	31,127
85	1,934	4,867	7,583	8,231
120	3,587	9,099	11,966	12,997
170	0,872	2,768	4,086	4,676
240	0,320	0,928	1,561	1,968

Tab. E.2.: Geeignete Stimuli zur Übertragung der Botschaft (A) „Achtung, Gefahr“, bewertet anhand der positiven diskriminativen Eignung. Angegeben sind die Parametereinstellungen, die Botschaftenzuordnungen der Vpn sowie die diskriminative Eignung gemäß Abschnitt 3.4.2.

Nr.	Parameter			Zuordnung			diskr. Eign.
	f [Hz]	a [%]	d [ms]	(A)	(B)	(C)	
1	42	100	400	19	3	2	0,44
2	42	100	800	17	5	2	0,29
3	42	75	800	15	6	3	0,28
4	42	100	200	14	6	4	0,20
5	85	75	800	15	8	1	0,19
6	85	100	800	15	7	2	0,14
7	120	100	800	13	10	1	0,11
8	42	100	100	13	8	3	0,11
9	42	50	800	13	9	2	0,09
10	42	50	400	13	6	5	0,05

Tab. E.3.: Geeignete Stimuli zur Übertragung der Botschaft (B) „Jetzt aufpassen“, bewertet anhand der positiven diskriminativen Eignung. Angegeben sind die Parametereinstellungen, die Botschaftenzuordnungen der Vpn sowie die diskriminative Eignung gemäß Abschnitt 3.4.2.

Nr.	Parameter			Zuordnung			diskr. Eign.
	f [Hz]	a [%]	d [ms]	(A)	(B)	(C)	
1	170	100	200	1	18	5	0,40
2	120	50	400	0	18	6	0,40
3	170	75	400	1	17	6	0,35
4	170	100	100	0	20	4	0,34
5	120	75	200	4	18	2	0,31
6	85	50	400	4	16	4	0,26
7	120	25	800	5	16	3	0,25
8	120	100	100	0	15	9	0,23
9	120	100	200	4	15	5	0,22
10	240	100	800	5	14	5	0,21

Tab. E.4.: Geeignete Stimuli zur Übertragung der Botschaft (C) „Gut gemacht“, bewertet anhand der positiven diskriminativen Eignung. Angegeben sind die Parametereinstellungen, die Botschaftenzuordnungen der Vpn sowie die diskriminative Eignung gemäß Abschnitt 3.4.2.

Nr.	Parameter			Zuordnung			diskr. Eign.
	f [Hz]	a [%]	d [ms]	(A)	(B)	(C)	
1	85	25	100	1	4	19	0,31
2	120	25	100	1	4	19	0,31
3	170	25	100	0	8	16	0,30
4	120	25	200	1	6	17	0,30
5	170	25	200	2	7	15	0,26
6	42	25	100	0	5	19	0,24
7	240	50	200	1	7	16	0,22
8	170	50	100	0	9	15	0,20
9	240	25	400	0	7	17	0,19
10	240	50	100	0	7	17	0,17

Literaturverzeichnis

- [ABD96] ANTONELLA, P. C. ; BOZZO, S. ; DAMIANI, S.: Driver Steering Task Support System To Improve Vehicle Lateral Control. In: *XXVI. FISITA Congress, Prag, Tschechien*, 1996
- [ABG99] AUGSBURG, K. ; BRUNNER, H. ; GROCHOWICZ, J.: Untersuchungen zum Rubbelverhalten von Pkw-Schwimmsattelbremsen. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 101 (1999), Nr. 1, S. 22–30
- [ABS06] ABEL, H.-B. ; BLUME, H.-J. ; SKABROND, K.: Bedienelemente. In: GEVATTER, H.-J. (Hrsg.) ; GRÜNHaupt, U. (Hrsg.): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik im Automobil*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2006, S. 391–395
- [ACD⁺04] ALEXANDER, L. ; CHENG, P.-M. ; DONATH, M. ; GORJESTANI, A. ; NEWSTROM, B. ; SHANKWITZ, C. ; TRACH, W.: DGPS-based Lane Assist System for Transit Buses. In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2004, S. 755–760
- [AG03] AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: Analysis of Variations in Diesel Engine Idle Vibration. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D* 217 (2003), Nr. 10, S. 921–933
- [AG05] AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: Human subjective response to steering wheel vibration caused by diesel engine idle. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part. D* 219 (2005), S. 499–510
- [AG07a] AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: Effect of automobile operating condition on the subjective equivalence of steering wheel vibration and sound. In: *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* 3 (2007), Nr. 2, S. 197–215
- [AG07b] AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: Hand-arm equal sensation curves for steering wheel rotational vibration. In: *11th International Conference on Hand-Arm Vibration*. Bologna, 2007
- [AG09a] AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: Non-linear dependency of the subjective perceived intensity of steering wheel rotational vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 39 (2009), Nr. 1, S. 58–67

- [AG09b] AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: A survey study of steering wheel vibration and sound in automobiles at idle. In: *Journal of the Engineering Integrity Society* 26 (2009), S. 6–14
- [AHMG+02] ATKINSON, P. ; HARIHARAN, P. ; MARI-GOWDA, S. ; TELEHOWSKI, P. ; MARTIN, D. ; VAN HOOFF, J. ; BIR, C. ; ATKINSON, T.: An under-hand steering wheel grasp produces significant injury risk to the upper extremity during airbag deployment. In: *46th Annual Proceedings of the Association for the Advancement of Automotive Medicine*, 2002
- [AKV+08] ANNUND, A. ; KECKLUND, G. ; VADEBY, A. ; HJÄLMDAHL, M. ; AKERSTEDT, T.: The alerting effect of hitting a rumble strip - A simulator study with sleepy drivers. In: *Accident Analysis & Prevention* 40 (2008), S. 1970–1976
- [AMTG05] AMMAN, S. ; MEIER, R. ; TROST, K. ; GU, P.: Equal Annoyance Contours for Steering Wheel Hand-arm Vibration / SAE. 2005 (2005-01-2473). – SAE-Bericht
- [Ape98] APEL, Andreas: *Modellierung des Fahrerhaltens bei Längs- und Querverführung von Pkw*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1998
- [ARA+98] ALLEN, R. W. ; ROSENTHAL, T. J. ; APONSO, B. L. ; KLYDE, D. H. ; ANDERSON, F. G. ; CHRSTOS, J. P.: *A Low Cost PC Based Driving Simulator for Prototyping and Hardware-in-the-Loop Applications*. SAE Paper, No. 98-0222, Spec. Pub. 1361, 1998
- [Arn10] ARNDT, S.: *Evaluierung der Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen - Prüfung eines Modells zur Vorhersage des Kaufverhaltens von Endkunden*, Technische Universität Dresden, Diss., 2010
- [Bék67] BÉKÉSY, G. von: *Sensory Inhibition*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1967
- [BA01] BYRNE, M. D. ; ANDERSON, J. R.: Serial modules in parallel: The psychological refractory period and perfect time-sharing. In: *Psychological Review* 108 (2001), S. 847–869
- [BAM11] BERUSCHA, F. ; AUGSBURG, K. ; MANSTETTEN, D.: Haptic Warning Signals at the Steering Wheel: A Literature Survey regarding Lane Departure Warning Systems (Short Paper). In: *Haptics-e, the electronic journal of haptic research* 5 (2011), Nr. 1, S. 1–6

- [Bar04a] BARTHEL, R.: *Ergonomische Betrachtung von Lenkassistentenfunktionen zur Fahrerunterstützung in kritischen Fahrsituationen*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2004
- [Bar04b] BARTHENHEIER, T.: *Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2004
- [BBB+96] BIELACZEK, C. ; BARZ, M. ; BREUER, B. ; ROHMERT, W. ; J., Breuer: Development of warning strategies and driver-vehicle interfaces. In: *Enhanced safety of vehicles*, 1996
- [BBL+86] BECK, P. ; BOETTIGER, F. ; LORENZ, R. ; PANIK, F. ; FAEHER, B. ; POPP, M: Fahrerinformationssysteme und Regelverhalten des Fahrers. In: *Entwicklungslinien in Kraftfahrzeugtechnik und Straßenverkehr. Forschungsbilanz 1986*, 1986, S. 66–75
- [BCLM98] BISHEL, R. ; COLEMAN, J. ; LORENZ, R. ; MEHRING, S.: *Lane Departure Warning for CVO in the USA*. SAE-Bericht 982779, 1998
- [BD09] BRUDER, R. ; DIDIER, M.: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: WINNER, H. (Hrsg.) ; HAKULI, S. (Hrsg.) ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, 2009
- [BEA+10] BERUSCHA, F. ; ENGELN, A. ; AUGSBURG, K. ; GASPERI, N. ; RIEDEL, S. ; SIMON, N.: Beeinflussung der Interpretation synthetischer Lenkradvibrationssignale durch Variation der Stimulusparameter. In: WISSENSFORUM, VDI (Hrsg.): *Proc. 5. VDI Fachtagung USEWARE*, 13.-14.10.2010, Baden-Baden. VDI-Berichte 2099. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2010, S. 49–58
- [Ben08] BENDER, E.: *Handlungen und Subjektivurteile von Kraftfahrzeugführern bei automatischen Brems- und Lenkeingriffen eines Unterstützungssystems zur Kollisionsvermeidung*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2008
- [BGJ80] BURKE, M. E. ; GILSON, R. D. ; JAGACINSKI, R. J.: Multi-modal information processing for visual workload relief. In: *Ergonomics* 23 (1980), S. 961–975
- [BGVC88] BOLANOWSKI, S. J. ; GESCHIEDER, G. A. ; VERRILLO, R. T. ; CHECKOSKY, C. M.: Four channels mediate the mechanical aspects of touch. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 84 (1988), Nr. 5, S. 1680–1694

- [Bie98] BIELACZEK, C.: *Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr*. VDI Verlag, 1998 (Fortschritt-Berichte VDI 12 Nr.357)
- [BK01] BULD, S. ; KRÜGER, H.-P.: Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit / Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften, Universität Würzburg. 2001. – Forschungsbericht
- [BL94] BRADLEY, M. M. ; LANG, P. J.: Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. In: *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry* 25 (1994), Nr. 1, S. 49–59
- [Bor98] BORG, G.: *Borg's Perceived exertion and pain scales*. Human Kinetics, 1998
- [Bou85] BOUIS, D.: *Möglichkeiten und Grenzen der haptischen Informationsdarstellung im Kraftfahrzeug*. 1985. – unveröffentlichter Zwischenbericht zum Projekt "Darstellung von Fahrerinformationen, insbesondere Leitinformationen, mit Berücksichtigung haptischer Kodierungsmöglichkeiten"
- [Bre96] BREUER, J.: *Ergonomische Beurteilung und Gestaltung der Sicherheit des Arbeitssystems Kraftfahrzeugführen*, Technische Hochschule Darmstadt, Diss., 1996
- [Bre09] BREUER, J.: Sicherheitsprognosen für neue Assistenzsysteme - Stand und Herausforderungen. In: *4. Darmstädter Kolloquium Mensch und Fahrzeug*, 2009, S. 95–101
- [Bro02] BROWN, I.D.: A laboratory comparison of two steering techniques. In: *12th Seminar on Behavioural Research in Road Safety*, 2002, S. 51–56
- [Bro05] BROWN, S. B.: *Effects of Haptic and Auditory Warnings on Driver Intersection Behavior and Perception*, Virginia State University, Diplomarbeit, 2005
- [BRW07] BREEDLOVE, S. M. ; ROSENZWEIG, M. R. ; WATSON, N. V.: *Biological Psychology*. 5. Auflage. Palgrave Macimilan, 2007
- [BSB07] BRANDT, T. ; SATTEL, T. ; BÖHM, M.: Combining haptic human-machine interaction with predictive pah planning for lane-keeping and collision avoidance systems. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2007, S. 582–587

- [BSG05] BERBER-SOLANO, T.P. ; GIACOMIN, J.: Perception Enhancement System for Automotive Steering. In: *Proceedings of the 2005 annual conference on European association of cognitive ergonomics*, 2005, S. 147–153
- [BTT⁺96] BRATTOLI, M. ; TASCA, R. ; TOMASINI, A. ; CHIOFFI, E. ; GERNA, D. ; PASOTTI, M.: A vision-based off-road alert system. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 1996
- [Bub01] BUBB, H.: Haptik im Kraftfahrzeug. In: JUERGENSOHN, T. (Hrsg.) ; TIMPE, K.-P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer Verlag, 2001, S. 155–175
- [Bus03] BUSCHARDT, B.: *Synthetische Lenkmomente*, Technische Universität Berlin, Diss., 2003
- [BWAU10] BERUSCHA, F. ; WANG, L. ; AUGSBURG, K. ; WANDKE, H.: Do drivers steer toward or away from lateral directional vibrations at the steering wheel? In: *Proc. 2nd European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 2010, S. 227–236
- [Cam93] CAMPENHAUSEN, C. von (Hrsg.): *Die Sinne des Menschen. Einführung in die Psychophysik der Wahrnehmung*. 2. Auflage. Georg Thieme Verlag, 1993
- [CJP97] CHEN, M. ; JOCHEM, T. ; POMERLEAU, D.: AURORA: A Vision-Based Roadway Departure Warning System. In: *Proc. IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, Human Robot Interaction and Cooperative Robots*, 1997
- [CL07] CAI, H. ; LIN, Y.: An Experiment to Non-Intrusively Collect Physiological Parameters towards Driver State Detection. In: *SAE 2007-01-0403* (2007), S. 101–106
- [CMH08] CHOUVARDAS, V. G. ; MILIOU, A. N. ; HATALIS, M. K.: Tactile displays: Overview and recent advances. In: *Displays* 29 (2008), S. 185–194
- [CMM05] CHAN, A. ; MACLEAN, K. ; MCGRENERE, J.: Learning and Identifying Haptic Icons under Workload. In: *Proc. First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems (WHC 2005)*. IEEE Computer Society, 2005, S. 432–439
- [Col08] COLE, D. J.: Steering Feedback: Mathematical Simulation of Effects on Driver and Vehicle. In: *ATZautotechnology* 8 (2008), Nr. 11-12, S. 52–56

- [CPT07] CHENG, Shinko Y. ; PARK, Sangho ; TRIVEDI, Mohan M.: Multi-spectral and multi-perspective video arrays for driver body tracking and activity analysis. In: *Computer Vision and Image Understanding* 106 (2007), S. 245–257
- [CRBM07] CAMPBELL, J.L. ; RICHARD, C.; ; BROWN, J.L. ; MCCALLUM, M.: Crash Warning System Interfaces: Human Factors Insights and Lessons Learned / Battelle Center vor Human Performance and Safety. 2007. – Forschungsbericht
- [DH05] DUDEL, J. ; HECKMANN, M.: Erregungsleitung und synaptische Übertragung. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; LANG, F. (Hrsg.) ; THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer Medizin Verlag, 2005
- [DHS09] DÖRNER, K. ; HIPPE, E. ; SCHWERTBERGER, W.: Bahnführungsassistenten für Nutzfahrzeuge. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, 2009
- [Die06] DIEDERICH, F.: *Kollisionsvermeidungssysteme und Stimulus-Response-Kompatibilität (Diplomarbeit)*, Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt, Diplomarbeit, 2006
- [Dil99] DILGER, E.: Elektronische Lenksysteme. In: *EUROFORUM-Konferenz*, 1999
- [DKB09] DRESSLER, A. ; KARRER, K. ; BRANDENBURG, S.: Gestaltung einer verhaltenswirksamen Müdigkeitsrückmeldung im Kraftfahrzeug. In: *MMI Interaktiv Sonderausgabe ZMMS Frühjahrsschule 2009* (2009), S. 1–7
- [DRS⁺01] DONG, R. G. ; RAKHEJA, S. ; SCHOPPER, A. W. ; HAN, B. ; SMUTZ, W. P.: Hand-Transmitted Vibration and Biodynamic Response of the Human Hand-Arm: A Critical Review. In: *Critical Reviews in Biomedical Engineering* 29 (2001), Nr. 4, S. 393–439
- [DS99] DEETJEN, P. ; SPECKMANN, E.-J.: *Physiologie*. 4. Auflage. Urban & Fischer bei Elsevier, 1999
- [DWBLE10] DE WARD, D. ; BOLD, T. Van d. ; LEWIS-EVANS, B.: Driver hand position on the steering wheel while merging into motorway traffic. In: *Transportation Research Part F* 13 (2010), S. 129–140
- [EAYM01] ENRIQUEZ, M. ; AFONIN, O. ; YAGER, B. ; MACLEAN, K.: A Pneumatic Tactile Alerting System for the Driving Environment. In: *Proceedings of the 2001 workshop on perceptive user interfaces*, 2001

- [EEA09a] ENGELBRECHT, A. ; ENGELN, A. ; ARNDT, S.: Unterstützung von Fahrkomfort und Fahrspaß durch Fahrerassistenzsysteme. In: *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22, Nr. 29*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2009, S. 451–456
- [EEA09b] ENGELBRECHT, A. ; ENGELN, A. ; ARNDT, S.: Wie entstehen Fahrkomfort und Fahrspaß? Beschreibung und Bewertung von Fahrkomfort und Fahrspaß aus Expertensicht. In: *VDI-Berichte 2085*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2009, S. 261–269
- [EEK08] ENGELN, A. ; ENGELBRECHT, A. ; KIENINGER, C.: Joy and convenience of driving. In: *4th International Congress of Traffic and Transport Psychology (ICTTP)*. Washington D. C., 2008
- [Eid04] EIDEHALL, A.: *An Automotive Lane Guidance System*, Universität Linköping, Diss., 2004
- [EJFN⁺08] EL JAFAFI, M. ; FORZY, J.-F. ; NAVARRO, J. ; MARS, F. ; HOC, J. M.: User acceptance and effectiveness of warning and motor priming assistance devices in car driving. In: *Proc. European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems*, 2008, S. 311–320
- [ENH86] EILERS, K. ; NACHREINER, F. ; HÄNECKE, K.: Entwicklung und Überprüfung einer Skala zur Erfassung subjektiv erlebter Anstrengung. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 40 (1986), Nr. 4, S. 215–224
- [Erp00] ERP, J. B. F.: Tactile Displays in Virtual Environments. In: *RTO HFM Workshop on "What Is Essential for Virtual Reality Systems to Meet Military Human Performance Goals"*, 2000
- [Erp01] ERP, J. B. F.: Tactile Navigation Display. In: BREWSTER, S. (Hrsg.) ; MURRAY-SMITH, R. (Hrsg.): *Haptic Human-Computer Interaction*. Springer Verlag, 2001, S. 165–173
- [Erp02] ERP, J. B. F.: Guidelines for the use of vibro-tactile displays in Human Computer Interaction. In: *Proc. Eurohaptics*, 2002, S. 18–22
- [Ert65] ERTEL, S.: Weitere Untersuchungen zur Standardisierung eines Eindrucksdifferentials. In: *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie* 12 (1965), S. 177–208
- [EV01] ERP, J. B. F. ; VEEN, H. A. H. C.: Vibro-Tactile Information Presentation in Automobiles. In: *Proc. Eurohaptics*, 2001

- [EV03] ERP, J. B. F. ; VEEN, H. A. H. C.: A multi-purpose tactile vest for astronauts in the international space station. In: *Proc. Eurohaptics*, 2003, S. 405–408
- [EW05] ENGELN, A. ; WITTIG, T.: How to find out the future need for driver support systems? In: *Advances in Transportation Studies. An International Journal, Section B* 7 (2005), S. 81–90
- [FKHK07] FITCH, G. M. ; KIEFER, R. J. ; HANKEY, J. M. ; KLEINER, B. M.: Toward Developing an Approach for Alerting Drivers to the Direction of a Crash Threat. In: *Human Factors* 49 (2007), Nr. 4, S. 710–720
- [Foe91] FOERSTER, H.-J.: Der Fahrzeugführer als Bindeglied zwischen Reifen, Fahrwerk und Fahrbahn. In: *VD-Berichte Nr. 916*. VDI Verlag, 1991
- [Fri09] FRICKE, N.: *Gestaltung von zeit- und sicherheitskritischen Warnungen im Fahrzeug*, Technische Universität Berlin, Diss., 2009
- [FS53] FITTS, P. M. ; SEEGER, C. M.: S-R Compatibility: spatial characteristics of stimulus and response codes. In: *Journal of Experimental Psychology* 46 (1953), S. 199–210
- [GA00] GIACOMIN, J. ; ABRAHAMS, O.: Human Fatigue Due to Automobile Steering Wheel Vibration. In: *SIA Conference on Car and Train Comfort*, 2000
- [GA05] GIACOMIN, J. ; AJOVALASIT, M.: Human Perception of Diesel Engine Idle Vibration. In: *ATA Ingegneria dell'Autoveicolo* 57 (2005), Nr. 5/6, S. 52–56
- [Gay05] GAYKO, J.: Evaluierung eines Spurhalteassistenten für das "Honda Intelligent Driver Support System". In: MAURER, M. (Hrsg.) ; STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer-Verlag, 2005
- [Gay09] GAYKO, J.: Lane Departure Warning. In: WINNER, H. (Hrsg.) ; HAKULI, S. (Hrsg.) ; WOLF, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Vieweg+Teubner, 2009
- [GCC96] GOBLE, A. K. ; COLLINS, A. A. ; CHOLEWIAK, R. W.: Vibrotactile threshold in young and old observers: The effects of spatial summation and the presence of a rigid surround. In: *Journal of the Acoustic Society of America* 99 (1996), Nr. 4, S. 2256–2269

- [Gel75] GELDARD, F. A.: *Sensory Saltation. Metastability in the Perceptual World*. Hillsdale New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates Inc., 1975
- [GG05] GIACOMIN, J. ; GNANASEKARAN, S.: Driver estimation of steering wheel vibration intensity: questionnaire-based survey. In: *Journal of the Engineering Integrity Society* 18 (2005), Nr. 1, S. 23–29
- [GGR⁺84] GREEN, P. ; GILLESPIE, T. ; REIFEIS, S. ; WEI-HASS, K. ; OTTENS, D.: Subjective Evaluation of Steering Effort Levels / The University of Michigan Transportation Research Institute. 1984. – Forschungsbericht
- [GMJHG⁺04] GONZÁLEZ-MENDOZA, M. ; JAMMES, B. ; HERNÁNDEZ-GRESS, N. ; TITLI, A. ; ESTÈVE, D.: A Comparison of Road Departure Warning Systems on Real Driving Conditions. In: *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2004
- [GO99] GIACOMIN, J. ; ONESTI, C.: Effect of Frequency and Grip Force on the Perception of Steering Wheel Rotational Vibration. In: *ATA 6th International Conference on the New Role of Experimentation in the Modern Automotive Product Development Process*, 1999
- [Gor66] GORDON, D. A.: Experimental Isolation of the Driver's Visual Input. In: *Human Factors* 8 (1966), Nr. 3, S. 129–137
- [GOS01] GEMPERLE, F. ; OTA, N. ; SIEWIOREK, D.: Design of a Wearable Tactile Display. In: *5th International Symposium on Wearable Computers (ISWC'01)*, 2001
- [Gre00] GREEN, M.: „How long does it take to stop?“ Methodological analysis of driver perception-brake times. In: *Transportation Human Factors* 2 (2000), S. 195–216
- [Gri90] GRIFFIN, M. J.: *Handbook of Human Vibration*. Academic Press, Inc., 1990
- [GS72] GELDARD, F. A. ; SHERRICK, C. E.: The Cutaneous 'Rabbit': A Perceptual Illusion. In: *Science* 178 (1972), Nr. 57, S. 178–179
- [GS94] GILLILAND, K. ; SCHLEGEL, R. E.: Tactile Stimulation of the Human Head for Information Display. In: *Human Factors* 36 (1994), Nr. 4, S. 700–717
- [GSDR04] GIACOMIN, J. ; SHAYAA, M.S. ; DORMEGNIE, E. ; RICHARD, L.: Frequency weighting for the evaluation of steering wheel rotational vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 33 (2004), S. 527–541

- [GST⁺08] GREEN, P. ; SULLIVAN, J. ; TSIMHONI, O. ; OBERHOLTZER, J. ; BUONAROSA, M. L. ; DEVONSHIRE, J. ; SCHWEITZER, J. ; BARAGAR, E. ; SAYER, J.: Integrated Vehicle-Based Safety Systems (IVBSS): Human Factors and Driver-Vehicle Interface (DVI) Summary Report / Transportation Research Institute, University of Michigan. 2008. – Forschungsbericht
- [Gui83] GUIARD, Yves: The Lateral Coding of Rotations: A Study of the Simon Effect with Wheel-Rotation Responses. In: *Journal of Motor Behavior* 15 (1983), Nr. 4, S. 331–342
- [GW04] GIACOMIN, J. ; WOO, Y.J.: Beyond Comfort: information content and perception enhancement. In: *Journal of the Engineering Integrity Society* 16 (2004), S. 8–16
- [GW05a] GIACOMIN, J. ; WOO, Y. J.: A study of the human ability to detect road surface type on the basis of steering wheel vibration feedback. In: *Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part. D* 219 (2005), S. 1259–1270
- [GW05b] GIACOMIN, J. ; WOO, Y.J.: Schwingungsdynamik des Lenksystems. Verbesserung von Information und Wahrnehmung. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 107 (2005), Nr. 5, S. 422–429
- [Han05a] HANDWERKER, H. O.: Allgemeine Sinnesphysiologie. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; LANG, F. (Hrsg.) ; THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 29. Auflage. Springer Medizin Verlag, 2005, S. 273–294
- [Han05b] HANDWERKER, H. O.: Somatosensorik. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; SCHAIBLE, H.-G. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5. Auflage. Springer Medizin Verlag, 2005, S. 203–228
- [HC86] HUGHES, P. K. ; COLE, B. L.: What attracts attention when driving? In: *Ergonomics* 29 (1986), S. 311–391
- [HE07] HEISSING, B. ; ERSOY, M.: Zukunftsaspekte des Fahrwerks. In: *Fahrwerkhandbuch*. Springer Verlag, 2007, S. 557–577
- [Hen85] HENSEL, H. (Hrsg.): *Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie*. 6. Auflage. Georg Thieme Verlag, 1985
- [HG97] In: HIRST, S. ; GRAHAM, R.: *The format and presentation of collision warnings*. Mahwah, NJ: Erlbaum, 1997, S. 203–219

- [Hic97] HICKEY, J. J.: Shoulder Rumble Strip Effectiveness: Drift-Off-Road Accident Reductions on the Pennsylvania Turnpike. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1573 (1997), S. 105–109
- [HM02] HAASNOOT, R. A. ; MANSFIELD, N. J.: Vibration at the Seat and Steering Wheel whilst driving over Small Bumps in Cars. In: 37th *United Kingdom Conference on Human Responses to Vibration*, 2002
- [HM03] HAASNOOT, R. A. ; MANSFIELD, N. J.: Effect of vibration envelope on relative sensation of vibration in a steering wheel. In: 38th *United Kingdom Conference on Human Response to Vibration*, 2003
- [HM04a] HAASNOOT, R. A. ; MANSFIELD, N. J.: Effect of Push/Pull and Grip Force on Perception of Steering Wheel Vibration. In: *Proc. 10th International Conference on Hand-Arm Vibration*, 2004
- [HM04b] HAASNOOT, R. A. ; MANSFIELD, N. J.: Perception of Steering Wheel Vibration: Effect of Magnitude and Duration. In: 39th *United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration*, 2004, S. 13–21
- [Hof08] HOFFMANN, J.: *Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2008
- [HPF05] HOUSER, A. ; PIEROWICZ, J. ; FUGLEWICZ, D.: Concept of Operations and Voluntary Operational Requirements for Lane Departure Warning Systems (LDWS) On-board Commercial Motor Vehicles / FMCSA (Federal Motor Carrier Safety Administration). 2005 (FMCSA-MCRR-05-005). – Forschungsbericht
- [HR10] HWANG, S. ; RYU, J.: The Haptic Steering Wheel: Vibro-tactile based Navigation for the Driving Environment. In: 8th *IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PERCOM Workshops)*, 2010, S. 660–665
- [HST05] HO, C. ; SPENCE, C. ; TAN, H. Z.: Warning signals go multisensory. In: *Proc. 11th International Conference on Human-Computer Interaction*, 2005
- [HTKS04] HAAS, C. T. ; TURBANSKI, S. ; KAISER, I. ; SCHMIDTBLEICHER, D.: Biomechanische und physiologische Effekte mechanischer Schwingungsreize beim Menschen. In: *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 2 (2004), S. 34–43

- [HTS05] HO, C. ; TAN, H. Z. ; SPENCE, C.: Using spatial vibrotactile cues to direct visual attention in driving scenes. In: *Transportation Research Part F* 8 (2005), S. 397–412
- [IKB06] ILLERT, M. ; KUHTZ-BUSCHBECK, J. P.: Motorisches System. In: SCHMIDT, F. (Hrsg.) ; SCHAIBLE, H.-G. (Hrsg.): *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5. Springer Medizin Verlag, 2006
- [Ise06] ISERMANN, R.: Das mechatronische Kraftfahrzeug. In: ISERMANN, R. (Hrsg.): *Fahrdynamik-Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. Wiesbaden : Vieweg Verlag, 2006, S. 1–26
- [JAG09] JEON, B.-H. ; AJOVALASIT, M. ; GIACOMIN, J.: Effects of gender differences on the subjective perceived intensity of steering wheel rotational vibration based on a multivariate regression model. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 39 (2009), Nr. 5, S. 736–743
- [Jan03] JANSSEUNE, L.: New Cockpit Human-Machine Interface Concept. In: *SAE* 2003-01-0123 (2003), S. 39–42
- [JJ75] JONSSON, S. ; JONSSON, B.: Function of the Muscles of the Upper Limb in Car Driving. In: *Ergonomics* 18 (1975), Nr. 4, S. 375–388
- [JL06] JONES, L. A. ; LEDERMAN, S. J.: *Human hand function*. Oxford University Press, 2006
- [JS08] JONES, L. A. ; SARTER, N. B.: Tactile Displays: Guidance for Their Design and Application. In: *Human Factors* 50 (2008), Nr. 1, S. 90–111
- [JSWY07] JENKINS, D.P. ; STANTON, N.A. ; WALKER, G.H. ; YOUNG, M.S.: A New approach to Designing Lateal Collision Warning Systems. In: *International Journal of Vehicle Design* 45 (2007), Nr. 3, S. 379–396
- [Kah73] KAHNEMAN, D.: *Attention and Effort*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1973
- [KEE07] KULLACK, A. ; EHRENPFOEDT, I. ; EGGERT, F.: ReflektAS - Anwendung verhaltenswissenschaftlicher Strategien am Beispiel eines Querföhrungsassistenten. In: *Fahrer im 21. Jahrhundert - Human Machine Interface*, 2007
- [KEE09] KULLACK, A. ; EHRENPFOEDT, I. ; EGGERT, F.: ReflektAS - Ein verhaltensbasiertes Assistenzsystem zur Querföhrung. In: 8. *Berliner Werkstatt "Mensch-Maschine Systeme"*, 2009

- [KELE08] KULLACK, A. ; EHRENPFORDT, I. ; LEMMER, K. ; EGGERT, F.: ReflektAS: lane departure prevention system based on behavioural control. In: *IET Intelligent Transport Systems* 2 (2008), Nr. 4, S. 285–293
- [KLF05] KIEFER, R. J. ; LEBLANC, D. J. ; FLANNAGAN, C. A.: Developing an inverse time-to-collision crash alert timing approach based on drivers' last-second braking and steering judgments. In: *Accident Analysis and Prevention* 27 (2005), S. 295–303
- [KM97] KIERAS, D. ; MEYER, D. E.: An overview of the EPIC architecture for cognition and performance with application to human-computer interaction. In: *Human Computer Interaction* 12 (1997), S. 391–438
- [KMH⁺09] KERN, D. ; MARSHALL, P. ; HORNECKER, E. ; ROGERS, Y. ; SCHMIDT, A.: Enhancing Navigation Information with Tactile Output Embedded into the Steering Wheel. In: *Proc. 7th International Conference on Pervasive Computing*. Nara, Japan : Springer Verlag, May 11-14 2009, S. 42–58
- [Kop94] KOPF, M.: *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. VDI Verlag, 1994
- [KPB⁺06] KOZAK, K. ; POHL, J. ; BIRK, W. ; GREENBERG, J. ; ARTZ, B. ; BLOOMER, M. ; CATHEY, L. ; CURRY, R.: Evaluation of lane departure warnings for drowsy drivers. In: *Proc. Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting*, 2006
- [Krü02] KRÜGER, H.-P.: Alter Wein in neuen Schläuchen? Das Konzept der „Erlernbarkeit“ bei Assistenz. In: *HdT-Tagung „Selbsterklärende Fahrerassistenz- und Informationssysteme“ (23.4.2002, München: Haus der Technik)*, 2002
- [KS09] KLEEN, A. ; SCHMIDT, G. F.: Haptische Ausweichempfehlung in Kollisionssituationen: Effektivität und Aspekte der Kontrollierbarkeit. In: *8. Berliner Werkstatt "Mensch-Maschine Systeme"*, 2009, S. 44–49
- [KSL⁺06] KIM, H. ; SEO, C. ; LEE, J. ; RYU, J. ; YU, S. ; LEE, S.: Vibrotactile Display for Driving Safety Information. In: *Proc. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006, S. 573–577
- [KWM09] KOENIG, W. ; WEISS, K.-E. ; MAYSER, C.: S.A.N.T.O.S.: Situationsangepasste und Nutzertypzentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung / Robert Bosch GmbH, BMW Group. 2009. – Projektabschlussbericht

- [Lan80] LANG, P. J.: Behavioral treatment and bio-behavioral assessment: computer applications. In: SIDOWSKI, J. B. (Hrsg.) ; JOHNSON, J. H. (Hrsg.) ; WILLIAMS, T. A. (Hrsg.): *Technology in mental health care delivery systems*. Ablex, 1980, S. 119–137
- [LBC97] LANG, P. J. ; BRADLEY, M. M. ; CUTHBERT, B. N.: International Affective Picture System (IAPS): Technical manual and affective ratings. / NIMH Center for the study of emotion and attention. 1997. – Forschungsbericht
- [LBHM99] LLOYD, D. M. ; BOLANOWSKI, S. J. ; HOWARD, L. ; MCGLONE, F.: Mechanisms of attention in touch. In: *Somatosensory and Motor Research* 16 (1999), Nr. 1, S. 3–10
- [LC95] LIU, A. ; CHANG, S.: Force Feedback in a Stationary Driving Simulator. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century* Bd. 2, 1995, S. 1711–1716
- [LH37] LAIDLAW, R. W. ; HAMILTON, M. A.: Thresholds of vibratory sensibility as determined by the Pallesthesiometer. In: *Bulletin of the Neurological Institute N.Y.* 6 (1937), S. 494–503
- [LH04] LESCH, P. A. ; HANCOCK, M. F.: Driving performance during concurrent cell-phone use: are drivers aware of their performance decrements? In: *Accident Analysis & Prevention* 36 (2004), S. 471–480
- [LHH04] LEE, J. D. ; HOFFMAN, J. D. ; HAYES, E.: Collision Warning Design to Mitigate Driver Distraction. In: *CHI 2004, 24.-29. April, Wien* Bd. 6, 2004, S. 65–72
- [LL07] LANG, F. ; LANG, P.: *Basiswissen Physiologie*. 2. Auflage. Springer Medizin Verlag, 2007
- [LM91] LECHNER, D. ; MALATERRE, G.: Emergency Maneuver Experimentation Using a Driving Simulator. / SAE-Paper. 1991. – Forschungsbericht
- [LTBK06] LANGE, C. ; TÖNNIS, M. ; BUBB, H. ; KLINKER, G.: Einfluss eines aktiven Gaspedals auf Akzeptanz, Blickverhalten und Fahrperformance. In: *VDI-Berichte Nr. 1960*. VDI Verlag, 2006
- [LWK08] LUTHERD, S. ; WITTE, H. ; KURTZ, P.: User-oriented design of I/O-interfaces for assistance systems by example of vibration output. In: *Proc. 53rd International Scientific Colloquium, TU Ilmenau, Prospects in Mechanical Engineering* Technische

- Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiete Arbeitswissenschaft und Biomechatronik, 2008, S. 71–72
- [Maj97] MAJJAD, R.: *Hybride Modellierung und Identifikation eines Fahrer-Fahrzeug-Systems*, Universität Karlsruhe, Diss., 1997
- [Man05] MANSFIELD, N. J.: *Human Response to Vibration*. 1. CRC Press, 2005
- [Mar01] MARSTALLER, R.: Fahrerverhaltensänderungen bei der fahrerassistierenden Kfz-Steuerung mit aktiven Bedienelementen gegenüber dem konventionellen Bedienkonzept. In: *VDI-Berichte 1613*. VDI Verlag, 2001, S. 297–313
- [MB07] MYLES, K. ; BINSEEL, M. S.: The Tactile Modality: A Review of Tactile Sensitivity and Human Tactile Interfaces / U.S. Army Research Laboratory. 2007 (ARL-TR-4115). – Final report
- [MD95] MEH, D. ; DENIŠLIĆ, M.: Influence of age, temperature, sex, height and diazepam on vibration perception. In: *Journal of Neurological Sciences* 134 (1995), S. 136–142
- [MDWB04] MARBERGER, C. ; DANGELMAIER, M. ; WIDLROITHER, H. ; BEKIARIS, E.: User centered HMI development in the AWAKE-project. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2004
- [MG05] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Thresholds for the perception of hand-transmitted vibration: Dependence on contact area and contact location. In: *Somatosensory and Motor Research* 22 (2005), Nr. 4, S. 281–297
- [MG08] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Absolute thresholds for the perception of fore-and-aft, lateral, and vertical vibration at the hand, the seat, and the foot. In: *Journal of Sound and Vibration* 314 (2008), S. 357–370
- [MG09] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Equivalent comfort contours for vertical vibration of steering wheels: Effect of vibration magnitude, grip force, and hand position. In: *Applied Ergonomics* 40 (2009), S. 817–825
- [Miw67a] MIWA, T.: Evaluation methods for vibration effect. Part 1. Measurements of threshold and equal sensation contours of whole body for vertical and horizontal vibrations. In: *Industrial Health* 5 (1967), S. 183–205

- [Miw67b] MIWA, T.: Evaluation methods for vibration effect. Part 3. Measurements of threshold and equal sensation contours on hand for vertical and horizontal sinusoidal vibrations. In: *Industrial Health* 5 (1967), S. 213–220
- [MK98] MISCHKE, M. ; KLINGNER, B.: Schwingungskomfort im Kraftfahrzeug. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 100 (1998), Nr. 1, S. 18–24
- [MMM06] MONTIGLIO, M. ; MARTINI, S. ; MURDOCCO, V.: Development of a lane keeping support system for heavy trucks. In: *ITS World Congress, London, 2006*
- [Mor38] MORRIS, C. W.: *Foundations of the Theory of Signs*. University Press, 1938
- [Mor03a] MORENA, D. A.: The Nature and Severity of Drift-Off Road Crashes on Michigan Freeways, and the Effectiveness of Various Shoulder Rumble Strip Designs. In: *TRB Annual Meeting, 2003*
- [Mor03b] MORIOKA, M.: Perception thresholds for vertical steering wheel vibration. In: *38th United Kingdom Conference on Human Response to Vibration, 2003*, S. 35–45
- [MOWI00] MOTOYAMA, S. ; OHTA, T. ; WATANABE, T. ; ITO, Y.: Development of Lane Departure Warning System. In: *7th World Congress on Intelligent Transport Systems ITS, 2000*
- [MP04] MANN, M. ; POPKEN, M.: Auslegung einer fahreroptimierten Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel eines Querführungsassistenten. In: *5. Braunschweiger Symposium, 2004*, S. 81–109
- [Nac08] NACHTWEI, J.: Handlungsstrategien als Kontrollvariable in Laborexperimenten - Konstruktion und Evaluation des Fragebogeninstrumentes FESE-R. In: *50. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP), 2008*
- [NMF⁺08] NAVARRO, J. ; MARS, F. ; FORZY, J.-F. ; EL JAAFARI, M. ; HOC, J. M.: Objective and subjective assessment of warning and motor priming assistance devices in car driving. In: WAARD, D. de (Hrsg.): *Human Factors for assistance and automation*. Shaker, 2008, S. 273–283

- [NMH⁺06] NAVARRO, J. ; MARS, F. ; HOC, J. M. ; BOISLIVEAU, R. ; VIENNE, F.: Evaluation of human-machine cooperation applied to lateral control in car driving. In: *Proc. 16th World Congress of the International Ergonomics Association*, 2006, S. 4957–4962
- [NMH07] NAVARRO, J. ; MARS, F. ; HOC, J. M.: Lateral Control Support for Car Drivers: a Human-Machine Cooperation Approach. In: *Proc. European Conference on Cognitive Ergonomics*, 2007
- [NUT⁺00] NISHIYAMA, S. ; UESUGI, N. ; TAKESHIMA, T. ; KANO, Y. ; TOGHI, H.: Research on Vibration Characteristics between Human Body and Seat, Steering Wheel, and Pedals (Effects of Seat Position on Ride Comfort). In: *Journal of Sound and Vibration* 236 (2000), Nr. 1, S. 1–21
- [Old71] OLDFIELD, R. C.: The assessment and analysis of handedness. The Edinburgh Inventory. In: *Neurophysiologica* 9 (1971), S. 97–113
- [OP08] OAKLEY, I. ; PARK, J.: Did you feel something? Distracter tasks and the recognition of vibrotactile cues. In: *Interacting with Computers* 20 (2008), S. 354–363
- [o.V03] o.V.: Märkte im Fokus: Automobilindustrie - Neue Chancen, zunehmender Investitions- und Finanzierungsbedarf / Deutsche Industriebank IKB. 2003. – Forschungsbericht
- [o.V07] o.V.: SUV owners need a hand to drive better. In: *New Scientist* 1 (2007), S. 16
- [PC06] PICK, A. J. ; COLE, D. J.: Measurement of Driver Steering Torque Using Electromyography. In: *Transactions of the ASME: Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 128 (2006), Nr. 4, S. 960–968
- [PC07] PICK, A. J. ; COLE, D. J.: Dynamic properties of a driver's arms holding a steering wheel. In: *Proc. Institutions of Mechanical Engineers* 221 (2007), S. 1475–1486
- [PC08] PICK, A. J. ; COLE, D. J.: A Mathematical Model of Driver Steering Control Including Neuromuscular Dynamics. In: *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 130 (2008), S. 9
- [PE03] POHL, J. ; EKMARK, J.: Development of a Haptic Intervention System for Unintended Lane Departure. In: *Proc. SAE World Congress, SAE Technical Paper 2003-01-0282*, 2003, S. 49–53
- [Pil97] PILUTTI, T. E.: *Lateral Vehicle Co-Pilot to Avoid Unintended Roadway Departure*, University of Michigan, Diss., 1997

- [PMLT86] POTTINGER, M.G. ; MARSHALL, K.D. ; LAWTHOR, J.M. ; THRASHER, D.B.: A review of tire/pavement interaction induced noise and vibration. In: POTTINGER, M.G. (Hrsg.) ; YAGER, T.J. (Hrsg.): *The tire pavement interface*. ASTM Interantional, 1986, S. 183–287
- [Pom95] POMERLEAU, Dean: RALPH: Rapidly Adapting Lateral Position Handler. In: *Proc. IEEE Intelligent Vehicle's Symposium*, 1995
- [PSoL⁺10] PEREIRA, M. ; SIMÕES, A. ; LANCELLE, V. ; BRUYAS, M. P. ; BRITSCHGI, V. ; DIEZ, J. L. ; GARCIA-QUINTEIRO, E. M. ; TURETSCHKEK, C. ; KAUFMANN, C.: A focus group approach towards an understanding of drivers' interaction with in-vehicle technologies. In: *Proc. 2nd European Conference on Human Centred Design for Intelligent Transport Systems*, 2010, S. 389–399
- [PU98] PILUTTI, T. E. ; ULSOY, G.: Decision Making for Road Departure Warning Systems. In: *Proc. American Control Conference*, 1998
- [PU03] PILUTTI, T. E. ; ULSOY, G.: Fuzzy-Logic-Based Virtual Rumble Strip for Road Departure Warning Systems. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 4 (2003), S. 1–12
- [PV06] PROCTOR, R. W. ; VU, K.-P. L. ; PROCTOR, R. W. (Hrsg.) ; VU, K.-P. L. (Hrsg.): *Stimulus-Response Compatibility Princples*. CRC Press, 2006
- [PWP04] PROCTOR, Robert W. ; WANG, Dong-Yuan D. ; PICK, David F.: Stimulus-response compatibility with wheel-rotation responses: Will an incompatible response coding be used when a compatible coding is possible? In: *Psychonomic Bulletin & Review* 11 (2004), Nr. 5, S. 841–847
- [RAZ04] RADTKE, P. ; ABELE, E. ; ZIELKE, A. E.: *Die smarte Revolution in der Automobilindustrie*. Redline Wirtschaft, 2004
- [RBS09] ROESLER, F. ; BATTENBERG, G. ; SCHÜTTLER, F.: Subjektive Empfindungen und objektive Charakteristika von Bedienelementen. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 111 (2009), Nr. 4, S. 292–297
- [Rei09] REISINGER, J.: *Parametrisierung der Haptik von handbetätigten Stellteilen*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [RF09] RIENER, A. ; FERSCHA, A.: Reconfiguration of Vibro-tactile Feedback based on Driver's Sitting Attitude. In: *2nd International Conferences on Advances in Computer-Human Interaction*, 2009, S. 234–242

- [RGRD05] ROSSMEIER, M. ; GRABSCH, H.-P. ; RIMINI-DÖRING, M.: Blind flight: Do auditory lane departure warnings attract attention or actually guide action? In: *Proc. ICAD 05: 11th Meeting of the International Conference on Auditory Display*, 2005
- [Rie09] RIENER, A.: *Sensor-Actuator Supported Implicit Interaction in Driver Assistance Systems*, Universität Linz, Diss., 2009
- [RK77] REYNOLDS, D. D. ; KEITH, R. H.: Hand-Arm Vibration, Part I: Analytical Model of the Vibration Response Characteristics of the Hand. In: *Journal of Sound and Vibration* 51 (1977), Nr. 2, S. 237–253
- [RLD⁺10] ROSARIO, H. de ; LOUREDO, M. ; DÍAZ, I. ; SOLER, A. ; GIL, J. J. ; SOLAZ, J. S. ; JORNET, J.: Efficacy and feeling of a vibrotactile Frontal Collision Warning implemented in a haptic pedal. In: *Transportation Research Part F* 13 (2010), Nr. 2, S. 80–91
- [RN00] ROCHLIS, J. L. ; NEWMAN, D. J.: A Tactile Display For International Space Station (ISS) Extravehicular Activity (EVA). In: *Aviation, Space, and Environmental Medicine* 71 (2000), Nr. 6, S. 571–578
- [Ros06] ROSSMEIER, M.: *Nonverbal Vehicle Language - Entwicklung und Evaluation einer nonverbalen und multimodalen Informationsstrategie für Systeme der Fahrzeugführung*, Universität Eichstätt-Ingolstadt, Diss., 2006
- [Rot95] ROTHE, S.: Fahrerwarnsystem - Einschlafwarner. In: *VDI Berichte Nr. 1188*. VDI Verlag, 1995
- [RSA77] REYNOLDS, D. D. ; STANDLEE, K. G. ; ANGEVINE, E. N.: Hand-Arm Vibration, Part III: Subjective Response Characteristics of Individuals to Hand-Induced Vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 51 (1977), Nr. 2, S. 267–282
- [RVKJ06] RESHETNEV, Andrey ; VAVILIN, Andrey ; KIM, Taeho ; JO, Kang-Hyun J.: Automobile Driving Interface Based on Hand Trajectory Recognition. In: *1st International Forum on Strategic Technology* Bd. 1, 2006, S. 1–4
- [SBKB06] SEEGER, G. ; BOERNER, S. ; KELLER, H. ; BEINBORN, P.: Strategien selbstorganisierten Lernens bei berufstätigen Studierenden. Ausgewählte Ergebnisse einer empirischen Untersuchung. In: *Journal für Sozialwissenschaften und Didaktik* 2 (2006), S. 1–19

- [SC86] SHERRICK, C. E. ; CHOLEWIAK, R.W.: Cutaneous Sensitivity. In: BOFF, K. (Hrsg.) ; KAUFMAN, L. (Hrsg.) ; THOMAS, J. L. (Hrsg.): *Handbook of Perception and Human Performance*. New York : Wiley, 1986, S. 12-1 – 12-58
- [Sch93] SCHUMANN, J.: *On the use of discrete proprioceptive-tactile warning signals during manual control: The steering wheel as an active control device*, Universität der Bundeswehr München, Diss., 1993
- [Sch09] SCHMIDT, G. F.: *Haptische Signale in der Lenkung: Controllability zusätzlicher Lenkmomente*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2009
- [SFW91] SCHUMANN, J. ; FÄRBER, B. ; WONTORRA, H.: Das Lenkrad als propriozeptiv-taktilen "Display". In: *33. Tagung experimentell arbeitender Psychologen (TeaP)*, 1991
- [SG08] SCOTT, J. J. ; GRAY, R.: A comparison of tactile, visual and auditory warnings for rear-end collision prevention in simulated driving. In: *Human Factors* 50 (2008), Nr. 2, S. 264-275
- [SGDR01] SHAYAA, M. S. ; GIACOMIN, J. ; DORMEGNIE, E. ; RICHARD, L.: Human perception of sinusoidal rotational steering wheel vibration. In: *36th United Kingdom Group Meeting on Human Responses to Vibration*, 2001
- [SGFW93] SCHUMANN, J. ; GODTHELP, H. ; FÄRBER, B. ; WONTORRA, H.: Breaking up open-loop steering control actions: The steering wheel as an active control device. In: GALE, A.G. (Hrsg.) ; BROWN, I.D. (Hrsg.) ; HASLEGRAVE, C.M. (Hrsg.) ; KRUYSSSE, H.W. (Hrsg.) ; TAYLOR, S.P. (Hrsg.): *Vision in Vehicles - IV*. Elsevier Science Publishers B.V., 1993, S. 321-332
- [SGK⁺98] SATO, K. ; GOTO, T. ; KUBOTA, Y. ; AMANO, A. ; FUKUI, K.: A Study on a Lane Departure Warning System Using a Steering Torque as a Warning Signal. In: *Proc. Symposium on Advanced Vehicle Control*, 1998
- [She93] SHEPHERD, G. M. (Hrsg.): *Neurobiologie*. 1. Auflage. Springer Verlag, 1993
- [Shu99] SHUTKO, J.: *An Investigation of Collision Avoidance Warnings on Brake Response Times of Commercial Motor Vehicle Drivers*, Virginia State University, Diplomarbeit, 1999

- [SJ03] SUZUKI, K. ; JANSSON, H.: An analysis of driver's steering behaviour during auditory or haptic warnings for the designing of lane departure warning system. In: *JSAE Review* 24 (2003), S. 65–70
- [SKA00] SATO, K. ; KUBOTA, Y. ; AMANO, Y.: Development of Steering Assist System (STAR) for the Lane Departure Warning. In: *7th World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2000
- [SKSG07] SCHMIDT, G. ; KISS, M. ; SWITKES, J. P. ; GERDES, J. C.: Auswirkungen haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System. In: *Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel, AAET*, 2007
- [SLT05] SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; LANG, F. (Hrsg.) ; THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer Medizin Verlag, 2005
- [SN92] SCHUMANN, J. ; NAAB, K.: On the effectiveness of an active steering wheel in critical driving situations - A proving ground experiment. In: *Proc. Conference on road safety in Europe*, 1992, S. 194–208
- [SS99] SKLAR, A. E. ; SARTER, N. B.: Good Vibrations: Tactile Feedback in Support of Attention Allocation and Human-Automation Coordination in Event-Driven Domains. In: *Human Factors* 41 (1999), Nr. 4, S. 543–552
- [SSD05] SAYER, T. B. ; SAYER, J. R. ; DEVONSHIRE, J. M. H.: Assessment of a driver interface for lateral drift and curve speed warning systems: mixed results for auditory and haptic warnings. In: *Proc. 3rd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2005
- [Sti05] STILLER, C.: Fahrerassistenzsysteme - Von realisierten Funktionen zum vernetzt wahrnehmenden, selbstorganisierenden Verkehr. In: MAURER, M. (Hrsg.) ; STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Springer Verlag, 2005, S. 1–20
- [Sto03] STOLLE, A. M.: *Taktile Illusionen: Wahrnehmung und neuronale Analyse spatiotemporaler Reizmuster*, Universität Mannheim, Diss., 2003
- [Str07] STRAYER, F. A. D. L. and Drews D. D. L. and Drews: Cell-Phone-Induced Driver Distraction. In: *Current Directions in Psychological Science* 16 (2007), S. 128–131

- [TC07] TRIVEDI, Mohan M. ; CHENG, Shinko Y.: Holistic Sensing and Active Displays for Intelligent Driver Support Systems. In: *Computer, Publication of the IEEE Computer Society* 40 (2007), Nr. 5, S. 60–68
- [Thu01] THURM, U.: Mechanosensorik. In: DUDEL, J. (Hrsg.) ; MENZEL, R. (Hrsg.) ; SCHMIDT, R. F. (Hrsg.): *Neurowissenschaften*. 2. Auflage. Springer Verlag, 2001, S. 333–353
- [TJP⁺96] TIJERINA, L. ; JACKSON, J. L. ; POMERLEAU, D. A. ; ROMANO, R. A. ; PETERSEN, A. D.: Driving Simulator Tests of Lane Departure Collision Avoidance Systems. In: *ITS America Sixth Annual Meeting*, 1996
- [TML⁺05] TANG, A. ; McLACHLAN, P. ; LOWE, K. ; SAKA, C. R. ; MACLEAN, K.: Perceiving ordinal data haptically under workload. In: *Proc. 7th International Conference on Multimodal Interfaces (ICMI'05)*, ACM Press., 2005, S. 317–324
- [TP97] TAN, H. Z. ; PENTLAND, A.: Tactual Displays for Wearable Computing. In: *Personal and Ubiquitous Computing* 1 (1997), Nr. 4, S. 225–230
- [TW07] THOMAS, J. A. ; WALTON, D.: Measuring Perceived Risk: Self-reported and actual hand positions of SUV and car drivers. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 10 (2007), Nr. 3, S. 201–207
- [TY03] TSUKADA, K. ; YASUMURA, M.: ActiveBelt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation. In: *Transactions of the Information Processing Society of Japan* 44 (2003), Nr. 11, S. 2649–2658
- [Ver62] VERRILLO, R. T.: Investigation of Some Parameters of the Cutaneous Thresholds for Vibration. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 34 (1962), Nr. 11, S. 1768–1773
- [Ver63] VERRILLO, R. T.: Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. In: *Journal of Experimental Psychology* 71 (1963), S. 570–575
- [Ver85] VERRILLO, R. T.: Psychophysics of vibrotactile stimulation. In: *Journal of the Acoustical Society of America* 77 (1985), Nr. 1, S. 225–232

- [VPC89] VIANO, David C. ; PATEL, Milan ; CICCONE, Michael M.: Patterns of Arm Position during Normal Driving. In: *Human Factors* 31 (1989), Nr. 6, S. 715–720
- [WBR06] WEILKES, M. ; BÜRKLE, L. ; RENTSCHLER, T.: Lane-Keeping-Support: Von haptischer Spurverlassenswarnung zu semi-autonomer Spurführung. In: *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2006
- [WBR05] WEILKES, M. ; BÜRKLE, L. ; RENTSCHLER, T. ; SCHERL, M.: Zukünftige Fahrzeugführungsassistenz - Kombinierte Längs- und Querregelung. In: *at - Automatisierungstechnik* 53 (2005), Nr. 1, S. 4–10
- [Wei68] WEINSTEIN, S.: Intensive and Extensive Aspects of Tactile Sensitivity as a Function of Body Part, Sex and Laterality. In: KENSHALO, D. R. (Hrsg.): *The Skin Senses*. Springfield : Charles C. Thomas, 1968, S. 195–222
- [Wel52] WELFORD, A. T.: The „physiological refractory period“ and the timing of high-speed performance – A review and a theory. In: *British Journal of Psychology* 43 (1952), S. 2–19
- [WG06] WOO, Y.J. ; GIACOMIN, J.: The Role of the Scale and the Frequency Bandwidth of Steering Wheel Vibration on Road Surface Recognition. In: *8th International Symposium on Advanced Vehicle Control*, 2006
- [WHU⁺10] WEBER, D. ; HENN, R. W. ; UHLER, W. ; MARBERGER, C. ; HOFFMANN, S. ; GAUTERIN, F.: Untersuchung des Fahrerverhaltens auf visuelle Ausweichanzeigen im kontaktanalogen Head-Up Display. In: *VDI-Berichte Nr. 2104*, 2010, S. 247 – 260
- [Wie05] WIESENDANGER, J.: Motorische Systeme. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; LANG, F. (Hrsg.) ; THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 29. Springer Medizin Verlag, 2005
- [Wil54] WILSKA, A.: On the Vibrational Sensitivity in Different Regions of the Body Surface. In: *Acta Physiologica Scandinavica* 31 (1954), Nr. 2-3, S. 285–289
- [Wil06] WILKS, C.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung eines wahrnehmungsbasierten Lernalgorithmus für ein taktiles Kommunikationssystem*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Diss., 2006

- [WL88] WICKENS, C. D. ; LIU, Y.: Codes and modalities in multiple resources: A success and a qualification. In: *Human Factors* 30 (1988), Nr. 5, S. 599–616
- [WLKB01] WEISSE, J. ; LANDAU, K. ; KLEMPAU, F. ; BREUER, B.: Characterization of Driver Behavior and Strain in Critical Situations. In: *2nd International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction*, 2001
- [Woo98] WOOD, D.: Tactile displays: present and future. In: *Displays* 18 (1998), S. 125–128
- [WPP03a] WANG, D. D. ; PROCTOR, R. W. ; PICK, D. F.: Stimulus-response compatibility effects for warning signals and steering responses. In: *Proc. 2nd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2003, S. 226–230
- [WPP03b] WANG, D. D.-Y. ; PROCTOR, R. W. ; PICK, D. F.: The Simon Effect With Wheel-Rotation Responses. In: *Journal of Motor Behavior* 35 (2003), Nr. 3, S. 261–273
- [WPPY07] WANG, D.-Y. D. ; PICK, D.F. ; PROCTOR, R.W. ; YE, Y.: Effect of a side collision-avoidance signal on simulated driving with a navigation system. In: *Proc. 4th International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2007, S. 206–211
- [WT05] WALTON, D. ; THOMAS, J. A.: Naturalistic observations of driver hand positions. In: *Transportation Research Part F* 8 (2005), S. 229–238
- [ZFRK95] ZIEGLER, W. ; FRANKE, U. ; RENNER, G. ; KÜHNLE, A.: Computer Vision on the Road: A Lane Departure and Drowsy Driver Warning System. In: *SAE Mobility Technology Conference & Exhibit, Sao Paulo, Brasil*, 1995
- [Zim05] ZIMMERMANN, M.: Das somatoviszerale sensorische System. In: SCHMIDT, R. F. (Hrsg.) ; LANG, F. (Hrsg.) ; THEWS, G. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. 29. Auflage. Springer Medizin Verlag, 2005, S. 295–316
- [Zlo88] ZLOTNIK, M. A.: Applying electro-tactile display technology to fighteraircraft - flying with feeling again. In: *Proc. IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)* Bd. 1, 1988, S. 191–197

